

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.03.002

## 切削加工有限元仿真技术的现状与展望

苏宏华<sup>1</sup>, 王禹封<sup>1</sup>, 谯木<sup>1</sup>, 赵正彩<sup>1</sup>, 赵彪<sup>1</sup>, 徐宝德<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100071)

**摘要:** 切削加工有限元仿真是采用数值方法模拟切削加工过程的技术, 可以研究切削加工过程中材料去除引发的各种物理机制, 在优化切削参数、提高加工质量、降低研究成本等方面具有显著优势。如何使切削加工有限元仿真与实际的切削加工更加吻合是研究的热点, 为此国内外开展了众多切削加工有限元仿真技术的研究工作, 相关成果已在多种关键部件的切削加工中得到工程应用。本文概述了切削加工有限元仿真的几何仿真和物理仿真各自的基本原理、优势和发展趋势, 系统总结了国内外学者为了提高切削加工有限元仿真的精度和效率, 在本构模型和网格划分方面所开展工作的发展现状, 综述了切削加工全过程动态仿真方法的研究进展, 并对切削加工有限元仿真技术的重要问题和未来发展趋势进行了展望。

**关键词:** 切削加工; 本构模型; 网格细化; 几何仿真

**中图分类号:** TG501 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)03-0361-18

### Review Current Questions and Strategies About Finite Element Simulation for Cutting Processing

SU Honghua<sup>1</sup>, WANG Yufeng<sup>1</sup>, QIAO Mu<sup>1</sup>, ZHAO Zhengcai<sup>1</sup>, ZHAO Biao<sup>1</sup>, XU Baode<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Beijing Xinghang Mechanical-Electric Equipment Co., Ltd., Beijing 100071, China)

**Abstract:** The cutting process finite element simulation technology is a numerical method to simulate the cutting process, which can investigate various physical mechanisms caused by material removal during the cutting process. It has significant advantages in optimizing cutting parameters, improving machining quality, and reducing research costs. The significantly investigate objective is how to make the finite element simulation of cutting process more consistent with actual cutting process, so numerous research on finite element simulation technology for cutting has been carried out both domestically and internationally, and the relevant achievements have been applied in engineering. This paper provides an overview of the basic principles, advantages, and development trends of geometric simulation and physical simulation in cutting process finite element simulation. It systematically summarizes the development of constitutive models and mesh partitioning by domestic and foreign scholars to improve the accuracy and efficiency of cutting machining finite element simulation. On this foundation, the research progress of the combination of geometric and physical simulation methods is summarized. Finally, the important issues and future development trends of finite element simulation technology for cutting machining are envisioned.

**基金项目:** 国家自然科学基金(92160301, 92060203)。

**收稿日期:** 2023-04-17; **修订日期:** 2023-05-17

**作者简介:** 苏宏华, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 入选江苏省“六大高峰”人才计划, 主持参与国家自然科学基金、国家科技重大专项、国家重点研发计划、航空科学基金、江苏省自然科学基金等 20 余项, 企业合作项目 30 余项; 获国家发明专利授权 30 余件; 获省部级科技奖励 3 项; 发表学术论文 100 余篇, 出版专著 1 部。

**通信作者:** 苏宏华, E-mail: shh@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 苏宏华, 王禹封, 谯木, 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. SU Honghua, WANG Yufeng, QIAO Mu, et al. Review current questions and strategies about finite element simulation for cutting processing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3): 361-378.

Key words: cutting processing; constitutive model; mesh refinement; geometric simulation

近年来,随着航空航天、汽车、生物医学和能源动力等高端产品性能要求的不断提高,各种高性能钛合金、高温合金、金属间化合物和复合材料等难加工材料不断投入应用,其关键部件的高效高品质加工给机械制造领域带来了巨大机遇和严峻挑战<sup>[1-5]</sup>。切削加工是制造领域减材成型的最主要方法,涉及了力学、热学和化学等多能场耦合现象,具有瞬时性和高度非线性特征。因此,如何准确揭示切削加工过程中的基本物理原理,进而预测和控制加工过程物理量是切削加工领域的重点问题,也是实现材料高品质、高效率 and 低成本加工的前提条件。

有限元仿真技术是一种将连续体视为若干个有限大小单元体的离散化集合,以求解连续体力、热问题的数值模拟方法。有限元仿真技术已经成为揭示切削加工过程物理机理的实用技术,能够定量预测和分析切削过程中切削力、温度、应力和应变等多个物理量的分布及演变规律,在提高材料加工质量、加工效率和降低工业成本等方面有着广阔的应用前景。由美国科学院工程技术委员会的相关统计可知,仿真技术的运用能够极大程度上节约综合成本 18%~50%,产品生产设计周期能够减少 30%~50%,产品质量也能够提高 5 倍以上。

切削加工有限元仿真的主流分析软件主要是: ABAQUS、DEFORM、AdvantEdge 和 ANSYS。通过查询重要文献数据库发现,近 20 年来,使用上述主流有限元仿真软件进行切削加工仿真的研究

文献由平均每年 20 篇增加到每年 300 篇以上(图 1)。ABAQUS 作为最常用的分析软件,具有强大的接触能力、多物理场耦合分析能力以及对特大型模型的高计算效率,允许用户根据工程实际需要定义用户材料本构模型,能够极大地满足切削加工有限元仿真的各种需求。2022 年,采用 ABAQUS 软件进行切削加工有限元仿真的研究论文数量达到 600 余篇,约相当于采用 AdvantEdge、ANSYS 和 DEFORM 软件的相关研究文献总和。

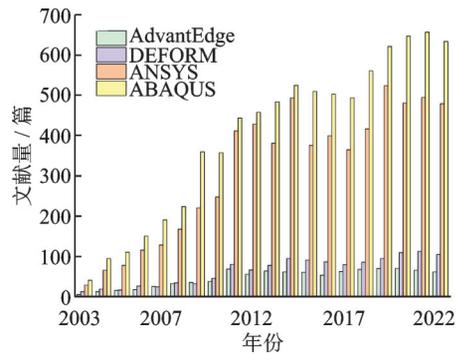


图 1 切削加工有限元仿真研究年文章数

Fig.1 Number of articles on finite element simulation investigate of cutting machining

采用 ABAQUS 进行切削加工有限元仿真的主要步骤包括:建立模型、模型离散、计算求解和结果提取(图 2)。其中,建立模型时近似场函数的准确性和模型离散时网格划分的合理性对仿真的质量和效率具有重要影响。近似场函数是指材料应力与应变之间的关系,即材料的本构模型。

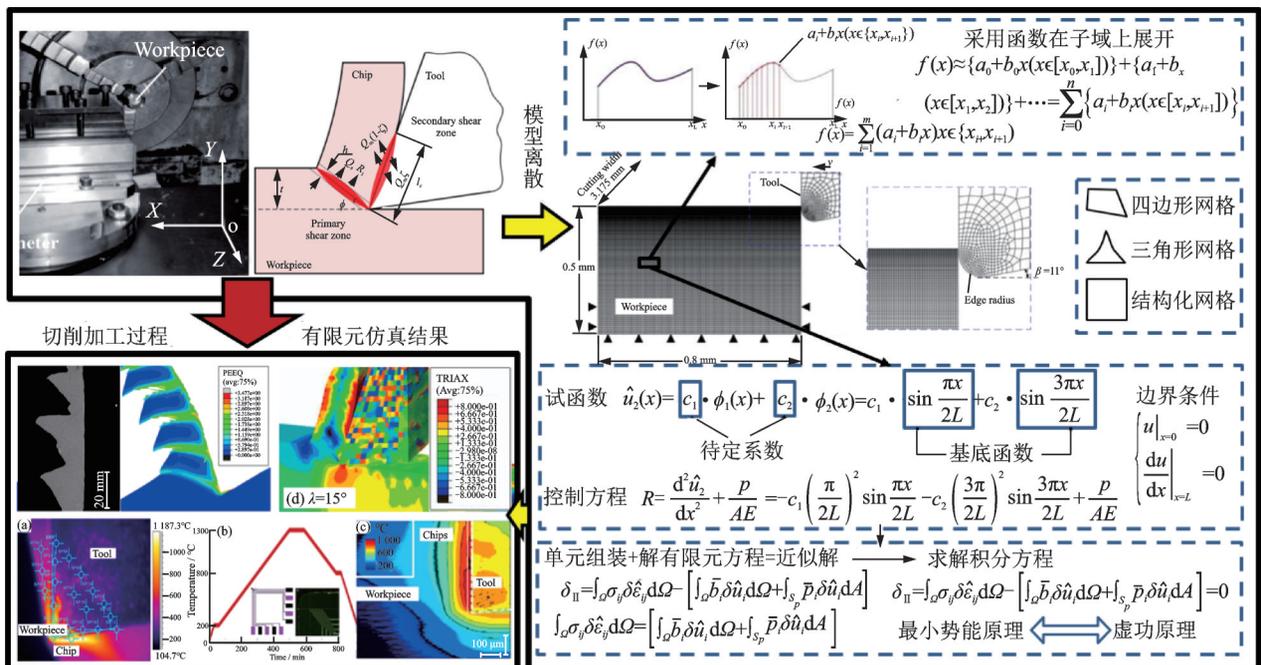


图 2 切削加工仿真流程<sup>[6-9]</sup>

Fig.2 Process of cutting simulation

网格划分是指模型离散单元的数量和质量,这涉及到在求解每个单元的结果后再整合逼近整体结构的仿真结果。因此,材料本构模型和网格划分方法主要影响切削加工有限元仿真的求解精度和运算效率。

近年来,国内外已开展了以提高仿真求解精度和运算效率为目标的大量提升切削加工有限元仿真与实际切削加工吻合程度的研究工作,本文对此进行了系统总结和分析。首先对存在物理因素介入的物理仿真中材料本构模型和网格划分方法的发展历程、研究现状进行了分析;然后讨论了单纯考虑几何尺寸改变的几何仿真特点,包括几何仿真的计算原理和发展脉络;论述了几何-物理仿真方法结合的切削加工有限元仿真技术的研究现状;最后,本文对切削加工有限元仿真技术的发展趋势和值得研究的重要问题进行了展望。

## 1 切削加工物理仿真现状

物理仿真是分析与预测切削加工过程中物理量的重要手段,对揭示材料去除机理和优化工艺都具有重要意义。准确描述材料本构关系和合理划分模型网格是提高切削加工有限元仿真求解精度和计算效率的关键。

### 1.1 材料本构模型

用于表征变形行为的本构模型可分为两

类<sup>[10]</sup>:(1)基于物理机制的本构方程式<sup>[11]</sup>,它是基于材料微观组织结构的变化会导致材料的变形行为发生改变的机制而提出的适合描述此类材料变形规律的本构方程式<sup>[12]</sup>,例如:Bodner-Partom (BP)<sup>[13]</sup>模型、Zerilli-Armstrong (Z-A)<sup>[14]</sup>本构模型、Strinberg-Guinan (SG)<sup>[15]</sup>模型等;(2)唯象本构模型,它是基于材料在宏观上表现出的力学特性,经过特定的力学性能试验,不断总结和分析温度、应变率、应变的变化对材料流动应力的影响规律而提出的经验模型,例如:Fields-Backofen (FB)模型、Voce-Kocks (VK)模型、Johnson-Cook (J-C)<sup>[16]</sup>模型和Molinari-Ravichandran (MR)模型等。

表1对比了部分基于物理机制的本构模型。其中,Z-A模型最具代表性,Zerilli和Armstrong基于金属位错力学理论推导出Z-A本构模型,它是基于热激活理论来描述应变率-温效应,针对不同晶体结构的金属具有不同的解析形式。相对于其他基于位错动力学的本构模型,Z-A本构模型表达形式较为简单,在工程中应用的也相对较多<sup>[17-21]</sup>。从表1中可以看出,基于物理基础的本构模型用于描述柔性固体材料的粘弹塑性力学行为,主要针对材料的微观非线性力学行为。由于常规金属材料的切削加工过程难以发生非线性力学行为,因此常规金属材料的本构模型多数是采用描述线性力学行为的J-C模型。

表1 基于物理机制本构模型之间的比较

Table 1 Comparison between constitutive models based on physical mechanisms

本构模型名称	材料力学属性	建模思想	特点
Bodner-Partom (BP) <sup>[14]</sup>	金属材料的黏弹塑性力学行为	基于不可逆热力学,位错动力学和内变量理论。	不考虑屈服条件以及加载和卸载准则;总应变率分成弹性和非弹性两个分量。
Zerilli-Armstrong (Z-A) <sup>[22]</sup>	金属材料的塑性流动行为	位错动力学理论;BCC和FCC晶体结构的塑性变形微观机制不同。	考虑温度、应变率和晶粒尺寸;将流动应力分为非热分量和热分量两部分。
Steinberg-Guinan (SG) <sup>[16]</sup>	高压下金属材料的塑性流动行为	剪切模量和屈服应力具有相同的温度和压强依赖性。	考虑了高温、高压和高应变率耦合加载下的材料力学行为;认为流动应力不会随着应变率的升高无限升高。
Steinberg-Lund (SL) <sup>[23]</sup>	高压下金属材料的塑性流动行为	流动应力等于热分量和非热分量之和,压强通过影响剪切模量影响流动应力。	相比于SG模型考虑了更大的应变率范围;体现了微观机制和宏观性能之间的联系。
Mecking-Kocks (MK) <sup>[24]</sup>	粘塑性力学行为	位错累积是塑性变形主要障碍。	流动应力是应变硬化和率-温效应的乘积;在应变硬化项中考虑动态回复。
机械阈值应力 (Mechanical threshold stress, MTS) <sup>[25]</sup>	考虑热激活控制的塑性流动行为	采用力学阈值应力作为内部结构参量。	认为应变率敏感性的突变并非是微观变形机制的改变,而是由于结构演化的应变率敏感性导致的。
Voyiadjis (VA) <sup>[26]</sup>	金属塑性变形的微观机制	位错动力学	采用应变率的幂函数形式,比与对数应变率成线性关系的模型能更好地描述FCC金属非线性的应变率效应。

唯象本构模型的最大应用优势是可以较方便地利用有限的实验结果拟合出相对较少的本构参数。J-C模型是迄今为止应用最广泛的唯象本构模型。Johnson和Cook通过对撞击和侵蚀的实验现象观测提出了J-C本构模型,此本构模型把材料在变形过程中的应力变化归结为应变强化、应变率强化和热软化效应之间的耦合作用。J-C本构模型形式较为简单,仅通过5个参数就能描述材料在大范围应变、应变率和温度下的应力应变关系,广泛应用于切削加工有限元仿真,并被集成于商业有限元分析软件<sup>[27-32]</sup>。除了J-C模型以外,还有很多唯象动态本构模型用来描述应力应变关系,例如:用于描述线性粘弹性模型的Maxwell模型、Kelvin模型等,它们假设材料的应力-应变关系包含弹性分量和粘性分量,具有时间依赖性。用于描述非线性弹性模型的MR模型假设材料的应力-应变关系不是线性的,而是随应变的增加而变化,可以更准确地描述材料的弹性性质。总的来说,不同的材料本构模型都有其适用范围和优缺点,选择合适的模型应该根据具体的问题和材料性质进行综合考虑。

唯象本构模型和基于物理机制的模型是通过对物理实验结果进行计算后获得的。然而在研究诸如钛合金、高温合金等难加工材料时,由于在切

削过程中材料受到高温和大应变率影响,使其产生高度非线性的变形行为,流动应力的影响因素之间也存在相互作用且具有非线性。这导致材料在切削加工时温度经常超过再结晶转变温度甚至相变温度,使得材料发生再结晶或相变。因此材料会一直处于软化状态,并具有高塑性、低变形抗力特性。常用的J-C本构模型和Z-A本构模型不能较好地反映材料在大应变下因材料的回复再结晶效应而引起的软化现象<sup>[33-35]</sup>,造成切削加工有限元仿真模型可靠性较差。因此,一些学者提出了修正的J-C模型和Z-A模型以解决上述问题,例如:Calamaz等<sup>[36]</sup>发现材料在低应变下存在应变硬化的现象,在高应变状态下存在应变软化现象,他们认为这种现象与材料的动态回复再结晶机制相关。为了更准确地描述这种现象,他们在J-C本构模型的基础上提出了TANH模型;Liu等<sup>[37]</sup>研究发现切削加工过程中材料除了发生动态回复和再结晶机制外,还会发生微裂纹等其他材料损伤现象。因此,他们在Z-A本构模型的基础上提出了Mod\_Z-A模型。表2比较了一系列为解决大应变软化问题的本构模型的建模修正思想和主要特点。这些模型的提出进一步充实了动态本构模型的材料科学基础。

表2 修正本构模型之间的比较

Table 2 Comparison between modified constitutive models

研究人员	模型名称	基础模型	修正思想	适用材料
Calamaz等 <sup>[36]</sup>	TANH	J-C模型	考虑了材料的动态回复再结晶机制	Ti6Al4V
Liu等 <sup>[37]</sup>	Mod Z-A	Z-A模型	引入应变梯度效应来描述材料的局部应变硬化行为	金属基复合材料
Nemat-Nasser等 <sup>[38]</sup>	Nemat-Nasser	J-C模型	材料在临界温度时,应力会受到动态应变时效的影响突然下降	高强度钢
Keer等 <sup>[39]</sup>	KHL	J-C模型	考虑应变和应变率耦合效应	Ti6Al4V
Cheng等	—	J-C模型	考虑了应力状态对流动应力的影响	
Zhang等 <sup>[40]</sup>	—	Z-A模型	考虑应变、温度和应变率对Z-A模型中参数 $C_3$ 的影响	Ni <sub>3</sub> Al基高温合金
Samantaray等 <sup>[41]</sup>	—	Z-A模型	结合J-C模型的特点,在Z-A模型中体现了塑性应变、温度和应变率之间的耦合影响关系	D9奥氏体不锈钢
Gao等 <sup>[42]</sup>	—	Z-A模型	考虑了应变历史、温度和应变率效应	FCC金属
Yuan等 <sup>[43]</sup>	—	Z-A模型	描述其各向异性、考虑动态应变时效的温度敏感性和分段的应变率敏感性	激光金属沉积的Inconel 718合金

另外,由于新材料的力学行为具有复杂多样特点,难以完全利用函数形式的本构模型描述其力学行为,许多研究人员开始研究不基于数学函数表达的建模方法来描述这些材料的力学行为。越来越多的研究证实了采用数据驱动方法建立材料本构是解决上述问题的关键途径。基于数据驱动研究材料本构模型的方法主要分为两种:神经网络本构模型和纯数据计算模型。

神经网络本构模型的建立过程是采用试验获

得应力-应变数据用于训练神经网络替代材料本构模型,多数是以应变和应变率作为输入,以应力增量作为输出。由于材料的复杂性、路径依赖性和非线性等原因,研究人员提出多种神经网络本构模型以解决上述问题,例如Ghaboussi等<sup>[44]</sup>提出了一种新的嵌套自适应神经网络本构模型来描述力学行为的路径依赖性。表3列举了多种神经网络本构模型的研究。

纯数据计算模型完全摆脱了传统的有限元计

表 3 神经网络本构模型的部分研究成果

Table 3 Partial research results of neural network constitutive models

研究人员	建模工具	输入层物理量	输出层物理量	描述对象	特点
Lefik <sup>[45]</sup>	反向传播神经网络(Back-propagation artificial neural network, BP ANN)	应变	应力	电缆流变学提出了弹塑性迟滞建模和不可逆非线性行为	神经网络在双轴非线性行为为近似中的应用。
Zopf <sup>[46]</sup>	循环神经网络(Recurrent neural network, RNN)	应变、应变率	应力	未固化天然橡胶的非弹性行为	代表应力-拉伸依赖性的神经网络只能在一维方向上进行分析,以产生纯弹性描述。
Rao <sup>[47]</sup>	BP ANN	温度、应变率	流动应力	碳钢热变形过程的流动应力预测	将 4 层反向传播神经网络应用于热变形过程的流动应力预测。
Hodgson <sup>[48]</sup>	集成现象学神经网络模型(Integrated phenomenology artificial neural network, IPANN)	温度、应变率、应变、加工硬化系数和加工硬化系数与应力的乘积	流动应力	预测应变硬化和动态再结晶行为	结合了 EM 和 ANN 模型;预测结果与 EM 和 ANN 相比更加准确。
Ji <sup>[49]</sup>	基于多层感知器(Multi-layer perceptron, MLP)的前馈-BP ANN	应变、对数应变速率和温度	流动应力	预测 Aermet100 钢的高温变形行为	相比于传统的 Arrhenius 方程, ANN 模型预测的结果更准确。
Sabokpa <sup>[50]</sup>	前馈-BP ANN 和 L-M 训练算法	温度、应变速率和应变	应力	预测铸造 AZ81 镁合金的高温流动行为	相比于本构方程更有效且更准确。
Haghdadi <sup>[51]</sup>	MLP 的前馈神经网络 ANN	温度、应变速率和应变	应力	铸造铝 A356 的高温流动行为	开展了传统解析本构模型与 ANN 模型预测能力的对比,认为 ANN 模型具有更精确的预测能力。
Abueidda <sup>[52]</sup>	长短期记忆(Long and short term memory, LSTM)、门控递归单元神经网络(Gated recursive unit, GRU)、时间卷积网络(Time convolutional network, TCN)	时间:平均应变张量;非时间:面积分数、变形路径	塑性能量和应力	计算热粘塑性本构模型	3 种方法都能完成,但 TCN 计算效率最高。

算模式,避免了材料本构模型的参与,多用于求解非线性三维力学问题。在 2016 年,Ortiz 和 Kirchdoerfer 共同提出了纯数据计算模型(Data-driven computational mechanics, DDCM),其建立过程是将试验获得的材料数据集执行计算,结合实验数据、基本守恒定律和相关约束,通过实验数据点和计算数据点之间在相空间中的距离最小化函数迭代优化得到满足边界条件的最优解。但随着求解维度从一维提高到二维或三维时,数据量呈几何倍数增加,求解迭代计算量也增加,导致求解效率低甚至无法求解。另外,由于纯数据计算模型的计算模式与现有的商用有限元软件不兼容,阻碍了其方法的扩展和推广。

1.2 本构模型参数获取方法

精确的材料本构模型参数是准确描述材料变形行为的关键因素之一。获取材料本构模型参数的方法有两种:(1)研究材料力学性能的实验方法(以下简称为实验法);(2)基于切削仿真模型的反求方法(以下简称为反求法)。实验法获取本构模型参数的方法是对材料进行力学性能测试,例如:采用静态、准静态材料进行拉伸试验,霍普金森压杆试验(Split hopkinson pressure bar, SHPB)等。

表 4 介绍了近年来采用实验法获取本构模型参数的相关研究。实验法适用于低应变( $\epsilon < 1$ )和低应变率( $10^{-4} \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^4 \text{ s}^{-1}$ )条件下的塑性变形过程,但不适用于高应变( $\epsilon > 1$ )和高应变率( $10^{-4} \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^4 \text{ s}^{-1}$ )过程。因此,实验法获得的材料本构模型参数与材料实际的物理行为相比存在一定差异,难以准确描述材料在整个变形过程中的变形特征。

反求法是根据切削试验结果反向求解材料本构模型参数的方法,切削加工过程中有 30 余种物理量和试验结果可以反映材料的变形行为<sup>[53]</sup>,并且切削试验本身的条件完全满足所需的材料变形条件。Liu 等<sup>[54]</sup>发现材料本构模型参数对切削加工有限元模型有较大的影响,模型中各个参数对绝热剪切带形成的影响程度不同,表明反求法获取模型参数是可行的。表 5 介绍了研究人员采用反求法获取本构模型参数的研究成果。具体而言,反求法是以个人经验选取初始参数,然后人为协调反求算法和目标适应度之间的关系。

综上所述,获取材料本构模型参数主要采用基于力学试验的实验法和借用切削加工有限元仿真的反求法。然而,使用实验法获得的本构模型参数

表4 实验法获取材料本构模型参数

Table 4 Constitutive model parameters obtained by experimental methods

研究人员	材料	实验条件	本构模型类型	模型参数
Pereira 等 <sup>[55]</sup>	IN718	方法:实验法 应变: $\epsilon < 0.2$ 应变率: $\dot{\epsilon} < 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 温度: $T = 30 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$	J-C 模型	$A = 400 \text{ MPa}$ $B = 1\,798 \text{ MPa}$ $N = 0.914\,3$ $C = 0.031\,2$ $m = 1.53$
Ozel 等 <sup>[56]</sup>	Ti6Al4V	方法:SHPB 应变: $\epsilon < 0.25$ 应变率: $\dot{\epsilon} < 10^3 \text{ s}^{-1}$ 温度: $T = 20 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$	J-C 模型	$A = 783 \text{ MPa}$ $B = 498 \text{ MPa}$ $C = 0.028$ $N = 0.28$ $m = 1.0$
Jaspers 等 <sup>[57]</sup>	AISI 1045	方法:SHPB 应变: $\epsilon < 0.2$ 应变率: $\dot{\epsilon} < 7.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 温度: $T = 35 \sim 625 \text{ }^\circ\text{C}$	J-C 模型	$A = 2\,100 \text{ MPa}$ $B = 1\,750 \text{ MPa}$ $N = 0.002\,8$ $C = 0.65$ $m = 0.75$
Meyer 等 <sup>[58]</sup>	Ti6Al4V	方法:SHPB 应变: $\epsilon < 0.1$ 应变率: $\dot{\epsilon} < 2.5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 温度: $T = 25 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$	Z-A 模型	$C_0 = 740 \text{ MPa}$ $C_1 = 240 \text{ MPa}$ $C_2 = 0.002\,4$ $C_3 = 0.000\,43$ $C_4 = 656$
Mohotti 等 <sup>[59]</sup>	Polyurea	方法:实验法 应变: $\epsilon < 0.8$ 应变率: $\dot{\epsilon} < 4 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ 温度: $T = 25 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$	MR 模型	$C_{10} = 203 \text{ MPa}$ $C_{01} = -185 \text{ MPa}$ $C_{11} = -55 \text{ MPa}$ $C_{20} = 28 \text{ MPa}$ $C_{02} = 27 \text{ MPa}$ $C_{21} = -14 \text{ MPa}$ $C_{12} = 14 \text{ MPa}$ $C_{30} = 3\,264 \text{ MPa}$ $C_{03} = -7\,800 \text{ MPa}$

表5 采用反求法获取本构模型参数的部分研究成果

Table 5 Partial research results on obtaining constitutive model parameters using the reverse method

研究人员	本构模型	材料	物理量	算法	特点
Shatla 等 <sup>[60]</sup>	修正的 J-C 模型	工具钢	切削力	模拟退火算法(Simulated annealing, SA)	与 SHPB 技术等实验法相比,提出的金属切削流动应力测定方法更简单,成本更低。
Klocke 等 <sup>[61]</sup>	J-C 模型	Inconel 718	切削力切屑几何	最小二乘法	算法从材料常数的解空间中识别出物理上合理的解,同时考虑了切削力分量和切屑几何形状。
Baker 等 <sup>[62]</sup>	J-C 模型	塑性材料	切削力剪切角	Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno(BFGS)算法	迭代 18 次即开始收敛,只需要少量的有限元模拟就可以找到材料参数,精度和效率大幅度提升。
Agmell 等 <sup>[63]</sup>	J-C 模型	AISI 4140	切削力切屑厚度	卡曼滤波算法	预测的 J-C 模型常数在模拟切削工艺参数与实验切削工艺参数之间的误差最大为 2%。

进行仿真时,其结果与实际切削加工过程中材料的变形行为相比仍有较大误差。有些仿真模型还需要根据实际变形行为不断地调试和修正,且常用的修正方法仍是传统的试错法。这导致仿真的周期长、效率低,也会造成仿真模型的模拟精度不足。另外,采用反求法获取材料本构模型参数时,参数区间的选取仍依赖个人经验,导致反求效率低,适应性差。因此,快速准确地获取材料本构模型参数是建立高精度切削加工有限元仿真模型的关键。

### 1.3 有限元模型网格划分技术

有限元模型中网格的合理划分方法也是影响仿真求解精度和求解效率的关键。由于有限元法

是将一个具体的模型离散化,增加网格与节点的数量在一定范围内可以大幅提高求解的精度。但随着离散化模型复杂度的增加,模型求解时间也随之增加,最终造成求解效率降低。因此,研究人员为了提高求解精度和求解效率对有限元模型网格的划分方法开展了大量研究。

根据有限元模型网格的拓扑关系,有限元模型网格分为结构化网格和非结构化网格。结构化网格是指所有交于同一节点的相邻网格单元和节点相同,网格内所有节点的拓扑结构均完全相同<sup>[64]</sup>。因此,结构化网格具有结构简单、生成速度快和生成质量好等优点,最具有代表性的是四边形网格与

六面体网格<sup>[65-67]</sup>。但由于结构化网格的规则形状仅适用于相对规整的模型,对于复杂模型来说结构化网格难以进行合理划分。

非结构化网格是指其内部节点的相邻单元数量不同,即不同网格节点相连接的网格数量可以不同<sup>[68-70]</sup>。非结构化网格的优点是能够对复杂区域进行合理的网格划分,最具有代表性的是三角形网格与四面体网格。但是,非结构化网格的主要缺点是网格的生成方式相对复杂,求解速度方面没有结构化网格快。当复杂模型采用非结构化网格进行全局划分时,通常选取较小的网格尺寸。这会导致模型整体网格数量激增,大幅度降低仿真求解速率。

为了实现模型网格的高效合理划分,研究人员提出了网格分区细化技术。切削加工有限元仿真模型的网格分区细化技术是将切削区域内的网格以一种既定规则进行细化,反之未切削区域或已切削区域则适当加粗网格。例如,在钛合金的切削加工有限元仿真中,研究人员为了得到锯齿状切屑将待去除材料区域的网格细化,不参与切削的区域网格粗化<sup>[71-72]</sup>,如图3所示。这种方法既得到了与实验相符的锯齿状切屑,还保证了有限元仿真效率。因此,局部网格细化方法能够保持切削区域网格的精度足够高,且求解效率在可接受范围内。

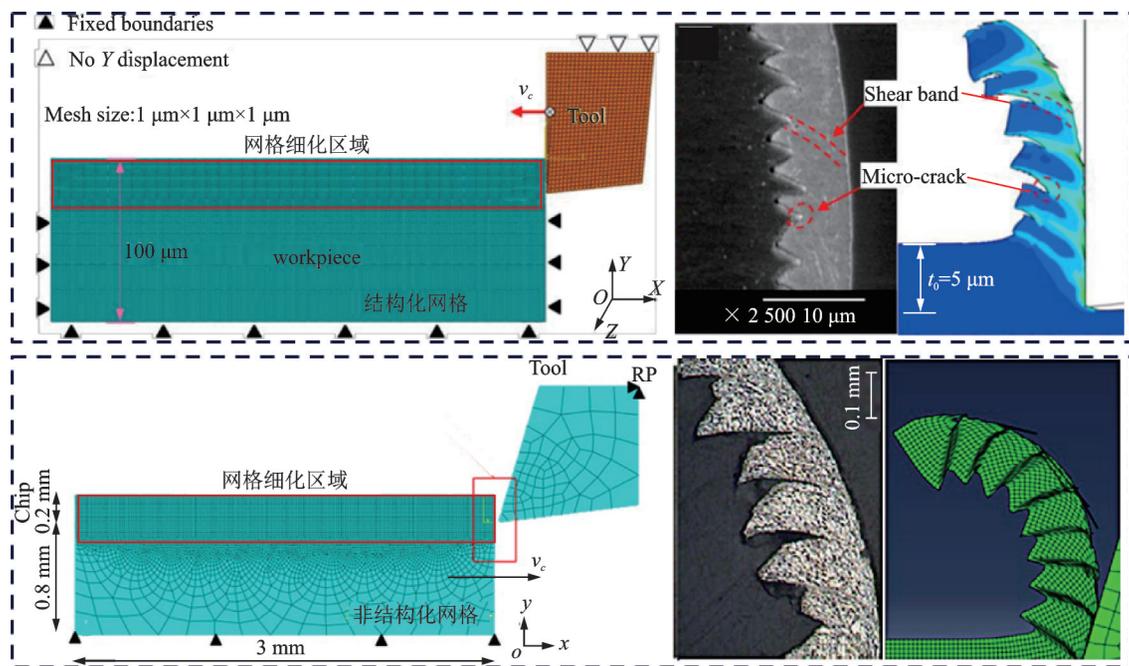


图3 钛合金切削加工有限元仿真网格局部细化研究<sup>[71-72]</sup>

Fig.3 Research status on local mesh refinement of finite element simulation for cutting titanium alloy

目前常用的网格细化方法包括:h方法、p方法、r方法和r-p方法,4种方法的对比如表6所示。其中,h-p方法的应用最广泛,它能利用更高阶多项式求近似解,以此得到更精确的数

值解。许多研究人员进行切削加工有限元仿真研究采用了h-p方法对模型网格进行细化,与采用h方法相比计算时间平均减少60%以上。

表6 常用的网格细化方法的对比

Table 6 Comparison of commonly used mesh refinement methods

方法名称	细化原理	特点
h方法	增加局部节点数量以提高网格密度	不改变插值函数的阶次; 确保网格饱满,不依赖初始网格
p方法	增加插值函数阶次,保持整体网格的尺寸和密度不变	方程组复杂化,求解计算量相应提升
r方法	移动网格节点和改变网格形状以增大局部网格密度	不改变有限元网格数量,也不改变插值函数的阶数
h-p方法	h方法与p方法混合	先加密网格,再提高插值函数阶数
r-p方法	r方法与p方法混合	网格节点和改变网格形状的同时,增加插值函数阶次

为了在保持求解精度的前提下进一步提高模型求解效率,研究人员在局部网格细化技术的基础

上提出了局部网格自适应动态细化技术。局部网格自适应动态细化技术是指在模型全局网格粗化

时,对仿真计算过程中物理量集中区域或变化梯度较大区域的网格进行自适应动态细化。局部网格自适应动态细化技术的实现主要包括3个过程:首先,选择几何或者物理误差指标来确定细化网格的特征(待细化区域和细化后网格尺寸);其次,根据误差指标进行判断,在局部区域将粗网格进行细化生成新网格;最后,将旧网格上的物理状态转移至新网格。根据网格细化判断准则的不同,可以将局部网格自适应动态细化方法分为基于几何的判断法和基于物理量的判断法。

基于几何的判断标准主要有两种:(1)对网格本身几何质量进行判断,当网格出现畸变时选择畸变网格进行细化;(2)通过几何位置进行判断,筛选指定区域内的网格进行进行细化。例如:黄丽丽<sup>[73]</sup>在几何实体上根据用户需求采用点、线、面及密度窗口的方式设定网格密度,如图4所示。南京航空航天大学的杨振等<sup>[74]</sup>和李宗旺等<sup>[75]</sup>分别提出了三维和二维网格的局部自适应动态细化算法,细化区域随刀具移动的几何位置进行选取。该算法应用于钛合金车削加工仿真时,与局部细化仿真模型相比求解速度分别提升了174.2%和210%。

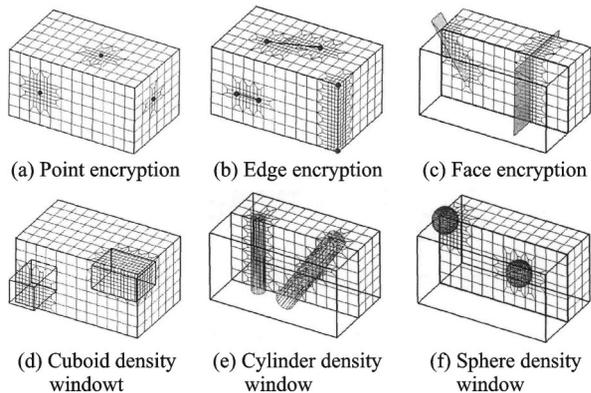


图4 基于几何判断法的局部网格自适应加密实例

Fig.4 An example of local mesh adaptive refinement based on geometric judgment method

但基于几何的网格细化算法多数是在仿真前进行预处理,根据已有的仿真结果来预设网格细化尺寸以获得最优细化参数。这种方法在进行不同材料及不同工艺下的切削加工有限元仿真时,需要多次重复调整细化参数,导致运算成本大幅度增加。因此,为了解决上述存在的问题,研究人员提出了基于物理量的网格自适应动态细化方法。

基于物理量的局部网格自适应动态细化方法是通过仿真过程中局部物理量的变化情况来动态细化网格,避免了需进行预处理实现网格动态细化的问题,具体细化流程是:首先,通过计算得到

基网格上的数值解;然后,根据基网格上数值解的梯度变化设定数值解的截断误差阈值;再根据该阈值进行相关物理量的判断,最终实现区域网格局部动态细化。多数研究人员采用有限元后验误差估计法来实现基于物理量的网格细化<sup>[76]</sup>,即利用有限元解构造误差估计量的一类方法。最终实现了在不同材料的不同本构模型在切削加工有限元仿真时,依据物理场的变化情况动态调整局部的网格尺寸,如图5所示。20世纪70年代Turcke等<sup>[77]</sup>建立了评估整体离散误差的基本框架,开创了后验误差估计研究先河,后来许多不同方法及技术被相继提出。

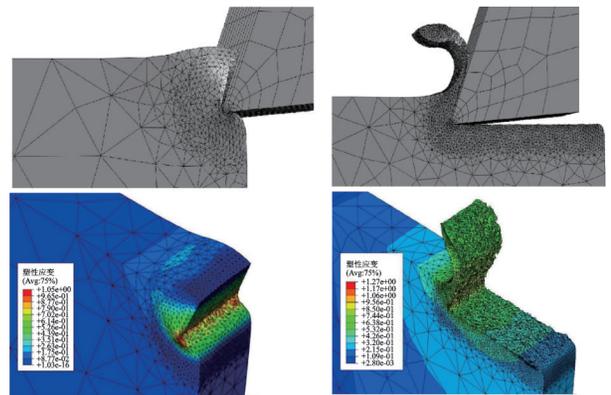


图5 基于物理量判断的局部网格自适应动态细化实例<sup>[78]</sup>  
Fig.5 An example of local mesh adaptive dynamic refinement based on physical quantity judgment<sup>[78]</sup>

目前主要的后验误差估计方法包括基于恢复的误差估计法和基于残差的误差估计法。基于恢复的误差估计法的原理是:常规有限元解可以通过后处理的投影技术获得恢复的应力或位移场,从而将误差定义为恢复解与原有限元解的差值。基于恢复的误差估计法主要依赖于超收敛的后处理应力或位移场,而超收敛应力或位移场的获得通常依赖于投影类方法。超收敛分片恢复法(Superconvergent patch recovery, SPR)由于计算量小、形式灵活,在工程领域的应用特别广泛,如商用有限元软件ABAQUS中集成了SPR法的自适应分析功能。尽管SPR法及其相关的拓展方法表现出了优良特性,但是在一些情况下超收敛点可能不存在,从而不依赖于超收敛点的恢复方法得到了发展。

基于残差的误差估计法的原理是:有限元解通常无法严格满足偏微分方程,从而形成非零残差,该残差可用来构造显式或隐式的误差估计<sup>[79-81]</sup>。显式误差估计是直接导出误差估计与局部区域残差的显式函数关系,最早由Babuška和Rheinboldt<sup>[82]</sup>提出了理论推导和一维问题的后验误差估

计公式,其后 Babuška 和 Miller 将之推广至二维平面弹性问题<sup>[83-85]</sup>。Ladeveze 和 Pelle 采用余能原理,得到了特征值的上下界,为网格自适应细化提供了一种解决方案<sup>[86]</sup>。与基于恢复的误差估计法相比,基于显示法残差的误差估计法的待定系数与问题相关,通常难以确定。基于隐式法残差的误差

估计法则通常需要在子域规模(单个或若干单元)上进行再次离散。基于局部问题的不同边界获得能量意义上的误差下界或者上界。总体而言,基于残差法和基于恢复法的误差估计方法影响较为广泛,表7列举了部分研究人员采用误差估计法进行网格自适应动态细化的研究成果。

表7 采用误差估计法进行网格自适应动态细化的研究成果

Table 7 Research results on adaptive dynamic refinement of grids using error estimation method

研究人员	细化方法	误差估计方法	物理量	研究对象
Yang 等 <sup>[87]</sup>	h方法	残差法后验误差估计	累积塑性应变值和延性损伤测量值的尺寸	预测塑性结构内部的损伤起始和宏观裂纹扩展
Friberg 等 <sup>[88]</sup>	p方法	残差法后验误差估计	应变率	悬臂梁
Wang 等 <sup>[89]</sup>	h-p方法	后验恢复误差估计法	Mises应力	预测裂纹扩展
Xing 等 <sup>[90]</sup>	h方法	残差法后验误差估计	应变能	超弹性复合材料的大变形断裂
Dehghan 等 <sup>[91]</sup>	h方法	后验恢复误差估计法	应变	有限元网格的自适应细化
Bonney 等 <sup>[92]</sup>	h-p方法	后验恢复误差估计法	应力场	各向同性金属材料孔应力场分布
Rassineux 和 Labergere <sup>[93]</sup>	h方法	后验恢复误差估计法	应力、塑性应变、温度、损伤	模拟切削加工过程中锯齿形切屑成形
Zhang 等 <sup>[94]</sup>	h-p方法	残差法后验误差估计	应力、应变温度	金属铣削加工过程

## 2 切削加工几何仿真现状

高保真度的几何仿真是追求复杂几何零件高精度切削加工有限元仿真的重要部分。几何仿真旨在构建虚拟成品零件的3D模型,计算模型和零件设计与加工之间的几何偏差。几何仿真是不考虑切削力、切削热、残余应力等物理因素介入的纯几何问题,假设在理想状态下进行切削加工过程。几何仿真多用于验证数控加工程序的准确性,即检验是否存在过切、欠切和干涉碰撞等状况。从20世纪80年代 Voelcker 和 Hunt<sup>[95]</sup>首次将几何仿真用于NC程序的检验开始,经过近40年的发展国内外对于几何仿真方面的研究日渐成熟。许多功能强大的数控加工仿真系统相继开发,如西门子的 Uni-graphics NX、CGTech 的 VERICUT、CNC Software Inc. 公司的 MASTERCAM、以色列的 Cimatron、达索公司的 SolidWorks、美国 PTC 的 Pro/Engineer 等。

数控加工仿真系统进行几何仿真的主要方法包括:基于图像的方法、基于实体建模的方法和离散方法。其中,基于图像的方法是利用图像空间中像素的属性设置来表示工件和模拟加工过程,如 Z-buffer 方法和 Raycasting 方法。该方法算法简单,可视化效果好且易于实现。但在仿真过程中视图方向难固定,仿真精度不高,所以该方法的应用并不广泛。

实现基于实体建模的方法是对工件模型和刀具扫描体模型进行运算。刀具扫描体是刀具在空间中按既定的刀具轨迹和运动方式从一个位置运

动到另一位置时,运动过程中形成的实体就是运动轨迹内的刀具扫描体。基于实体建模的方法进行几何仿真是以工件模型和刀具扫描体体积之的空间分割表达法或离散矢量求交法来模拟材料去除过程<sup>[96-98]</sup>。离散矢量求交法是采用离散点将几何模型的设计曲面近似拟合,每个离散点都对应一个矢量。切削加工过程的实现是通过离散点的矢量与刀具扫描体进行求交运算。这种方法常用于复杂曲面数控加工的误差检验,与直接实体造型法相比减少了计算量。但是仿真精度不高,在实际工程中应用较少。

空间分割表达法的基本思想是:采用一组基本元素近似表示工件的实体模型,简化实体与实体之间的布尔运算。空间分割表达法可以大幅度提高仿真速度和效率,是目前研究最多、应用最广的几何仿真方法。根据基本元素近似表达整体模型的数据结构和分割方法的不同,空间分割表达法主要分为:Dexel表达法、Voxel表达法、八叉树表达法、四叉树表达法、光线表达法、基于 Z-Map 模型的方法等,几种方法的对比如表8所示。但是,如果要获得较高求解精度的模型,需要计算机有足够大的存储空间来实现。

离散方法是另一类近似方法,通过给定精度范围内的离散工件来表示整体工件<sup>[99]</sup>。离散方法在切削加工有限元仿真中是将复杂的三维布尔减法运算简化为简单的一维或二维布尔减法运算,工件模型的离散方法主要包括:基于点向量法<sup>[100]</sup>、偶数空间分解法<sup>[101]</sup>、细节层次法<sup>[102]</sup>等。由于其算法简单,在几何仿真方法中也得到了一些关注和应用。

表8 不同空间分割表达法的比较

Table 8 Comparison of different space segmentation expressions

研究人员	表达方法	刀具扫描体建模方法	主要研究内容	特点
Abdel Malek等 <sup>[103]</sup>	Dexel表达法	雅可比矩阵降秩法	开发了依据机床加工轨迹的扫描体	广泛适用于隐式曲面的扫描体建模
Blackmore等 <sup>[104-105]</sup>	Voxel表达法	基于扫描微分方程的方法	数控加工中平端刀具四块运动的仿真	初始位置计算掠点集,其余掠点由扫包络方程的流生成,大大降低了计算复杂度
Joshi和Sonawane <sup>[106]</sup>	八叉树(Oc-tree)表达法	基于包络理论的方法	切屑几何形状的分析建模	预测切屑几何模型与实验结果的吻合度达到90%
Chiou和Lee <sup>[107]</sup>	四叉树表达法	基于扫描微分方程的方法	开发了通用自动编程刀具扫掠轮廓的显式表示	与传几何仿真方法相比,提供了刀具扫掠后轮廓的显式解,多用于五轴数控加工验证
Ma等 <sup>[108]</sup>	基于Z-Map模型法	距离场和包络理论	五轴铣削刀具-工件啮合计算方法	利用刀具扫描体执行三阶段相交检测和加速布尔运算从加工中的工件中减去材料
Fleisig和Spence <sup>[109]</sup>	四叉树表达法	基于包络理论的方法	型腔粗加工仿真	通过考虑刀具浸没度相关的边和面相交图,大幅度减少了运算时间
Zhu和Li <sup>[110]</sup>	光线表达法	球面同余包络理论	五轴圆锥刀具侧铣加工	考虑刀具跳动的刀具轨迹优化问题建模为混合整数线性规划问题,可显著减小因跳动引起的几何误差
Roth等 <sup>[111]</sup>	四叉树表达法	压痕曲线法	五轴铣削加工	与三轴加工的解析解的结果完全吻合,既可用于刀具轨迹的验证,也可用于刀具轨迹的修正

离散法进行几何仿真存在的主要问题是它表示了具有离散点的几何模型,但为了提高精度而增加离散点的数量会导致计算成本增加。总体来说,几何仿真在理论与软件开发方面都发展的较为成熟,但几何仿真并不能揭示人们所关注的加工过程的切削机理和物理量变化规律,如:切削力、切削热、切屑形态、应力、应变、变形和振动等。

### 3 切削加工全过程动态仿真

通过上述综述可知,国内外对切削加工有限元仿真进行了深入的研究,在数值模型的计算精度和求解效率方面进行了优化和改进。但切削加工是一个连续的物理过程,随着切削加工的进行,工件加工质量受到各种物理量相互累加作用的影响。单纯的几何仿真或物理仿真难以模拟出切削加工全过程的动态变化。因此,完成切削加工全过程的动态仿真是研究切削加工过程的最终目标,能够更加充分地发挥有限元仿真技术的优势,是未来实现智能制造的必然发展趋势。

现有的切削加工物理仿真商业软件都难以高效率地完成复杂零件切削加工全过程物理仿真,其主要问题是:完全考虑切削加工全过程的物理仿真则计算效率会大幅度下降,甚至无法完成运算;只考虑几何加工仿真则无法考虑切削加工过程中物理量的变化情况。

为了进行完整的切削加工有限元仿真,很多学者研究了与物理仿真相结合的方法。Strenowski等<sup>[112]</sup>最早将有限元建模方法引入数控加工

几何仿真中,提出了一种单元分离方法用于模拟切削加工过程。Herbert等<sup>[113]</sup>在几何仿真中引入切削力的作用,综合考虑了“机床-工件-刀具-夹紧装置-切削参数”组成的整个制造系统,对工艺进行了优化,提高了几何仿真精度。Gong等<sup>[114]</sup>提出了一种新的算法,用于为通过有限元模拟和网格映射获得的新模具表面构建数控加工刀具路径,确定了所有刀位点相对于新模具网格运动的位置,工件厚度测量结果与有限元仿真结果吻合度较好,验证了算法的准确性,有助于提高了产品质量和生产效率。此外,国内的清华大学<sup>[115]</sup>、哈尔滨工业大学<sup>[116]</sup>、东北大学<sup>[117]</sup>、上海交通大学<sup>[118]</sup>、西安交通大学<sup>[119]</sup>、天津大学<sup>[120]</sup>、南京航空航天大学<sup>[121]</sup>等高校对几何仿真和物理仿真集成也进行了有益的研究与探索。

在上述几何仿真和物理仿真集成的研究中,“生死单元”技术多用于完成高精度高效率的切削加工全过程仿真。“生死单元”技术是对指定的网格单元进行“生”或“死”设置,使其在该分析步中增加到模型上或从模型中去除<sup>[122-124]</sup>。网格单元的“生”或“死”主要是通过单元刚度矩阵失效的方法来实现,具体方法为:采用数值很小的因子(小于 $10e^{-6}$ )与单元的刚度矩阵相乘,随后该单元刚度矩阵的数值也就变得极小(接近于零),从而使其刚度矩阵在计算中失效。“生死单元”的基本原理如方程(1)所示,其中, $F$ 是施加在网格节点的力, $K$ 为刚度矩阵, $U$ 为节点矩阵。当刚度矩阵无限小时,网格单元的力 $F$ 也无限小,甚至可以忽略不计。因此,可以通过控制刚度矩阵实现单元的启用或失效。

$$F = K \cdot U \quad (1)$$

当设置单元为“生”时,可通过重新激活其刚度矩阵的方法将该单元的刚度、质量、单元载荷等恢复到原来状态<sup>[125-127]</sup>。同理,用上述方法将单元“杀死”后,该单元的质量、比热等也会变得极小。因此,“生死单元”技术应用在切削全过程仿真时,学者们结合切削加工刀轨选择工件上待去除区域的网格单元,将其在对应分析步中设置为“死”,即完成了切削加工全过程的几何仿真部分<sup>[3, 5, 128]</sup>。物理仿真是计算刀具与工件接触产生的作用力及材料去除后材料产生的弹塑性变形。因此,通过施加移动载荷的方式模拟切削加工中的切削力对工件的作用,以此模拟物理仿真过程。在 ABAQUS 软件中可以采用“Model change”模块实现“生死单元”技术,在该软件中用“生死单元”技术进行切削加工有限元仿真的示例如图 6 所示。通过“生死单元”方法能够完成几何仿真与物理仿真的结合,实现了提高仿真效率的同时减小仿真精度的损失。

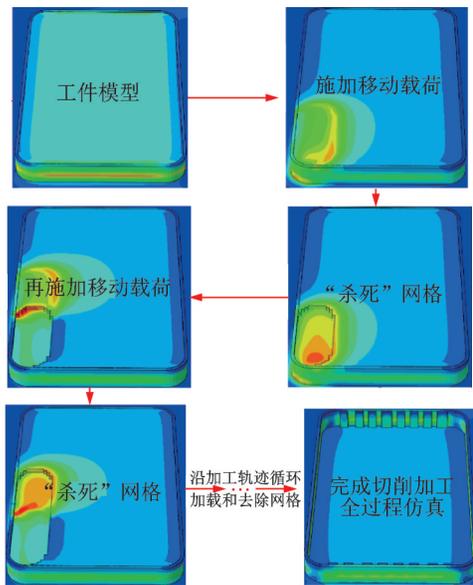
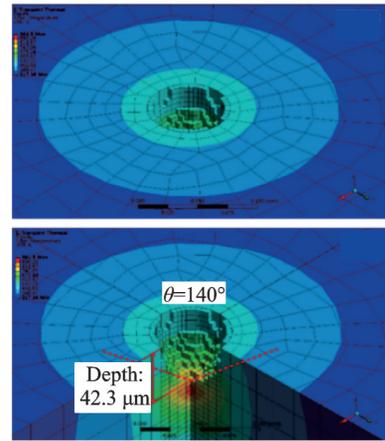
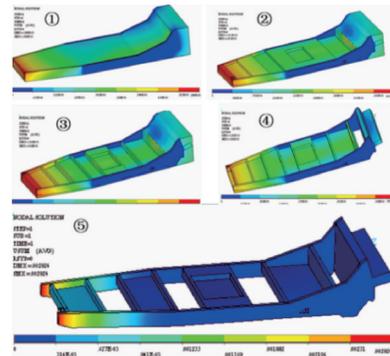


图 6 “生死单元”技术实现切削加工全过程仿真流程  
Fig.6 Whole cutting process simulation process by the “birth-death element” technology

采用“生死单元”技术实现几何-物理结合方法进行切削加工全过程仿真可以研究整个切削加工过程中刀具与工件接触作用的累加效果,能够充分发挥有限元仿真的优势。Zhao 等<sup>[3]</sup>提出了一种基于变形力推算残余应力场的无损方法,用有限元仿真方法验证了所提出方法的准确性。在进行有限元仿真时,他们采用生死单元技术去除了待切削区域的材料。Zhang 等<sup>[129]</sup>利用生死单元技术建立了钛合金钻孔和螺旋铣孔的三维瞬态温度场和材料去除模型。他们研究了材料去除机理及不同工艺参数对材料温度场分布的影响,如图 7(a)所示。



(a) Drilling simulation machining of Ti alloy



(b) Finite element simulation of thin-walled parts cutting

图 7 “生死单元”在切削加工有限元仿真中的应用

Fig.7 Application of “birth-death element” technology in finite element simulation

Awan 等<sup>[130]</sup>对薄壁件机械加工过程进行了有限元仿真,采用生死单元技术研究了不同区域加工顺序对工件残余应力的影响,如图 7(b)所示。龚智鹏等<sup>[131]</sup>采用生死单元技术研究了薄壁件的装夹方案和加工顺序对零件整体变形的影响,与试验方法相比误差约为 13.9%。

但目前由于技术手段和计算机硬件性能的限制,实现几何-物理结合方法在仿真时做了大量简化。若深入研究几何-物理结合仿真方法并且提高计算机硬件性能,对零件切削加工质量的仿真预测将会更加精准。

## 4 展 望

近年来切削加工有限元仿真技术得到了广泛研究,它与实验方法相比节约了大量的时间和成本,能对切削加工过程进行定性和定量分析,例如:研究加工变形区域应力分布规律,优化切削加工工艺参数等。但是,随着产品制造质量的不断提高,切削加工有限元仿真需进一步提高求解精度和求解效率来满足加工需求。建立更加完善的材料本构模型来反映材料应力-应变关系以提高求解精度,开发更加合理的局部网格自适应动态细化方法

来提高求解效率,进一步加强几何-物理仿真结合的准确度以完全实现切削加工全过程动态仿真。因此,使切削加工全过程动态仿真完全走向实际应用还有3方面需要加强。

(1)建立一个兼顾通用性与准确性的材料本构模型。随着多种新型难加工金属材料的研制,其对应变速率的敏感性存在差异。在有限数据范围内针对某一材料构建的本构模型预测精度虽高,但其通用性也受限,缺少一种适用于多种材料的本构模型。目前唯象本构模型和基于物理机制本构模型的修正模型越来越多,但在模型修正时未考虑其在数值模拟中的应用是否便利,难以应用在切削加工全过程仿真。唯象本构模型可以有效预测宏观变形,基于物理机制的本构模型有较强的宏-微观变形预测能力,但现有的本构模型都未在材料的微观层面结合宏观力学对应变速率机理展开研究。因此,需要深化应变速率对材料动力学响应的作用机理研究,采用多尺度分析方法,建立一个宏-微观耦合的本构模型,以准确描述应变速率敏感性及其他特征各异的材料,重塑本构模型通用性与准确性的平衡。同时,数据挖掘方法正在成为从理论中揭开材料应力-应变关系的有效手段,其能够从试验或仿真结果中抓取关键因素并建立联系,有望替代传统用函数关系表达材料本构模型的模式。

(2)开发更加合理的局部网格自适应动态细化方法。现阶段,局部网格自适应动态细化方法包括跟随刀具移动位置判断细化区域的几何细化方法和根据仿真物理量是否达到给定阈值判定细化区域的物理细化方法。几何细化方法的优点是随着刀具移动动态选取细化区域,但几何细化方法的网格细化尺寸是预先设定的,在仿真过程中会出现细化级数不合理的现象,需多次调整才能获得满足要求的细化尺寸。物理细化方法的优点是网格细化程度与物理量相关,只需设置相关阈值即可获得合理的细化尺寸。但物理细化方法的细化区域不固定,在仿真过程中会出现细化区域与刀具运动轨迹产生偏差的情况。为此,可以在现有的网格自适应动态细化方法基础上开发一种兼顾几何细化和物理细化的细化方法,提高局部网格细化的合理性和细化区域的准确性,进一步提高切削加工有限元仿真的求解效率。

(3)提高几何-物理仿真结合方法的准确性。现有几何-物理仿真结合技术多数是采用“生死单元”实现,但其在实现切削加工全过程仿真时进行了大量简化,在计算效率提高的同时亦带来了新的问题。例如:金属切削加工过程会产生让刀效应,但在几何仿真部分预先设置了切削区域,无法根据

材料去除后网格变形情况来重新调整网格去除区域。为此,可以在网格自适应细化技术的基础上开发一种自适应“生死单元”技术,对已变形网格再进行二次细化,在二次细化的基础上重新选择下一步待去除网格区域。

另外,随着物联网、大数据等新一代信息技术与制造业的融合与发展,数字孪生的需求越来越强烈,实现切削加工过程的数字孪生是未来发展的必然趋势。通过数字孪生技术将物理空间与虚拟空间建立联系,在虚拟空间中完成切削加工的全过程动态仿真,能实时映射物理空间的切削加工状态,实现对加工过程的实时调控,大幅度提高加工质量和安全性。目前,在虚拟空间中可以实现切削加工的几何仿真,但难以实现物理仿真。主要问题是切削加工全过程动态仿真的实时性难以满足数字孪生需求,以及切削加工过程中物理量在线检测技术和数据实时映射技术不完善。因此,对软件来说,可以借助机器学习开发一种更效率的切削加工有限元仿真方法,实现切削加工的实时仿真;对于硬件来说,仿真运算和数据处理需要更高性能的计算机提供支撑,才能有效降低物理空间与虚拟空间之间信息交互的延迟时间。

## 5 结 论

本文详细回顾和讨论了切削加工有限元仿真的研究现状。首先在物理因素介入的物理仿真层面上介绍了影响仿真精度和仿真效率的关键因素,包括:材料本构模型、本构模型参数选取方法和网格划分技术。然后讨论了单纯考虑几何尺寸改变的几何仿真特点,包括几何仿真的计算原理和发展脉络,几何仿真用于仿真切削加工过程是否存在过切、欠切和干涉碰撞等状况。随后论述了几何-物理仿真方法结合的切削加工有限元仿真技术的研究现状。总之,建立完善材料本构模型、获取精准的材料本构模型参数、开发合理的网格划分方法是实现高精度和高效率切削加工物理仿真的关键,将几何仿真和物理仿真结合实现切削加工全过程动态仿真后,能够更深入且全面地探究切削机理、预测加工表面质量和控制加工变形等,为提高切削加工产品质量和降低成本作出重大贡献。

### 参考文献:

- [1] DONG W, JIMENEZ X A, TO A C. Temperature-dependent modified inherent strain method for predicting residual stress and distortion of Ti6Al4V walls manufactured by wire-arc directed energy deposition[J]. Additive Manufacturing, 2023, 62: 103386.

- [2] ZHANG X, CHENG Y, LV M. Study on high-speed vibration cutting of titanium alloy considering cutting edge radii[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 124(10): 3327-3342.
- [3] ZHAO Z, LIU C, LI Y. A new method for inferring and representing a workpiece residual stress field using monitored deformation force data[J]. *Engineering*, 2023, 22(4):9-59.
- [4] JIANG X, KONG X, HE S. Modeling the superposition of residual stresses induced by cutting force and heat during the milling of thin-walled parts[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 356-370.
- [5] WEBER D, KIRSCH B, JONSSON J E. Simulation based compensation techniques to minimize distortion of thin-walled monolithic aluminum parts due to residual stresses[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2022, 38: 427-441.
- [6] CHEN G, CAUDILL J, REN C. Numerical modeling of Ti-6Al-4V alloy orthogonal cutting considering microstructure dependent work hardening and energy density-based failure behaviors[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 82: 750-764.
- [7] LIANG X, LIU Z, WANG B. Friction behaviors in the metal cutting process: State of the art and future perspectives[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2022(5):012002.
- [8] ULLAH I, ZHANG S, ZHANG Q. Numerical investigation on serrated chip formation during high-speed milling of Ti-6Al-4V alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 71: 589-603.
- [9] WANG B, LIU Z, CAI Y. Effects of tool angles and uncut chip thickness on consumption of plastic deformation energy during machining process[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 87: 123-132.
- [10] 何临江. Ti<sub>2</sub>AlNb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.  
HE Linjiang. Fundamental research on machining of Ti<sub>2</sub>AlNb intermetallic alloys[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [11] 袁康博,姚小虎,王瑞丰. 金属材料的率-温耦合响应与动态本构关系综述[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(9): 1-35.  
YUAN Kangbo, YAO Xiaohu, WANG Ruifeng. A review on rate-temperature coupling response and dynamic constitutive relation of metallic materials[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(9): 1-35.
- [12] SUN Y, LI G, HE Z. The advance of research on constitutive model used in finite element simulation of metal cutting[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(9): 4921-4945.
- [13] ZERILLI F J, ARMSTRONG R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 61(5): 1816-1825.
- [14] DECKE J, ENGELHARDT A, RAUCH L. Predicting flow stress behavior of an AA7075 alloy using machine learning methods[J]. *Crystals*, 2022, 12(9): 1281.
- [15] TANG M, ZHANG J, YUE J. Thermomechanical behaviour modelling and microstructure evolution of high Cr-Co-Mo aerospace bearing steel[J]. *Materials Science and Technology*, 2023, 39(8): 994-1009.
- [16] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[J]. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistic*, 1983, 21: 541-547.
- [17] SAVAEDI Z, MOTALLEBI R, MIRZADEH H. A review of hot deformation behavior and constitutive models to predict flow stress of high-entropy alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 903: 163964.
- [18] SHANG H, WU P, LOU Y. Machine learning-based modeling of the coupling effect of strain rate and temperature on strain hardening for 5182-O aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 302: 117501.
- [19] GURUSAMY M, RAO B C. A modified Zerilli - Armstrong constitutive model for simulating severe plastic deformation of a steel alloy[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2022, 236(8): 1022-1036.
- [20] BONDNER S R, PARTOM Y. Constitutive equations for elastic-viscoplastic strain-hardening materials[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1975, 42(2): 385-389.
- [21] ZERILLI F J, ARMSTRONG R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 61(5): 1816-1825.
- [22] STEINBERG D J, COCHRAN S G, GUINAN M W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(3): 1498-1504.
- [23] STEINBERG D J, LUND C M. A constitutive model for strain rates from  $10^{-4}$  to  $10^6$  s<sup>-1</sup>[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 65(4): 1528-1533.
- [24] MECKING H, KOCKS U F. Kinetics of flow and strain-hardening[J]. *Acta Metallurgica*, 1981, 29: 1865-1875.

- [25] FOLLANSBEE P S, KOCKS U F. A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable [J]. *Acta Metallurgica*, 1988, 36(1): 81-93.
- [26] VOYIADJIS G Z, ABED F H. Microstructural based models for bcc and fcc metals with temperature and strain rate dependency [J]. *Mechanics of Materials*, 2005, 37(2/3): 355-378.
- [27] SHOKRY A, GOWID S, MULKI H. On the prediction of the flow behavior of metals and alloys at a wide range of temperatures and strain rates using Johnson-Cook and modified Johnson-Cook-Based Models: A review [J]. *Materials*, 2023, 16(4): 1574.
- [28] WANG Y, XING J, ZHOU Y. Tensile properties and a modified s-Johnson-Cook model for constitutive relationship of AA7075 sheets at cryogenic temperatures [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 942: 169044.
- [29] LEROCH S, EDER S J, VARGA M. Material point simulations as a basis for determining Johnson-Cook hardening parameters via instrumented scratch tests [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2023, 267: 112146.
- [30] TEKKAYA B, MEURER M, DÖLZ M. Modeling of microstructural workpiece rim zone modifications during hard machining [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 311: 117815.
- [31] SOORI M, AREZOO B. Minimization of surface roughness and residual stress in abrasive water jet cutting of titanium alloy Ti6Al4V [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. DOI: 10.1177/09544089231157972.
- [32] SOORI M, AREZOO B. Cutting tool wear minimization in drilling operations of titanium alloy Ti-6Al-4V [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. DOI: 10.1177/13506501231158259.
- [33] SIMA M, ÖZEL T. Modified material constitutive models for serrated chip formation simulations and experimental validation in machining of titanium alloy Ti-6Al-4V [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(11): 943-960.
- [34] GU L, WANG M. Experimental and analytical study on adiabatic shear localized fracture characteristics in high-speed machining of pure titanium alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119: 5079-5093.
- [35] DUCOBU F, RIVIÈRE-LORPHEVRE E, FILIPPI E. Material constitutive model and chip separation criterion influence on the modeling of Ti6Al4V machining with experimental validation in strictly orthogonal cutting condition [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 107: 136-149.
- [36] CALAMAZ M, COUPARD D, GIROT F. A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48: 275-288.
- [37] LIU R, MELKOTE S, PUCHA R. An enhanced constitutive material model for machining of Ti-6Al-4V alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(12): 2238-2246.
- [38] NEMAT-NASSER S, GUO W, NESTERENKO V F. Dynamic response of conventional and hot isostatically pressed Ti-6Al-4V alloys: Experiments and modeling [J]. *Mechanics of Materials*, 2001, 33(8): 425-439.
- [39] KHAN A S, HUANG S. Experimental and theoretical study of mechanical behavior of 11-aluminum in the strain rate range  $10^{-5}$ — $10^4$  s<sup>-1</sup> [J]. *International Journal of Plasticity*, 1992, 8(4): 397-424.
- [40] ZHANG H, WEN W, CUI H. A modified Zerilli-Armstrong model for alloy IC10 over a wide range of temperatures and strain rates [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 527: 328-333.
- [41] SAMANTARAY D, MANDAL S, BORAH U. A thermo-viscoplastic constitutive model to predict elevated-temperature flow behaviour in a titanium modified austenitic stainless steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 526: 1-6.
- [42] GAO C Y, ZHANG L C. A constitutive model for dynamic plasticity of FCC metals [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527: 3138-3143.
- [43] YUAN K, GUO W, LI P. Thermomechanical behavior of laser metal deposited Inconel 718 superalloy over a wide range of temperature and strain rate: Testing and constitutive modeling [J]. *Mechanics of Materials*, 2019, 135: 13-25.
- [44] HASHASH Y M A, JUNG S, GHABOUSSI J. Numerical implementation of a neural network based material model in finite element analysis [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 59(7): 989-1005.
- [45] LEFIK M, SCHREFLER B A. Artificial neural network as an incremental non-linear constitutive model for a finite element code [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2003, 192: 3265-3283.
- [46] ZOPF C, KALISKE M. Numerical characterisation of uncured elastomers by a neural network based ap-

- proach[J]. *Computers & Structures*, 2017, 182: 504-525.
- [47] RAO K P, PRASAD Y K D V. Neural network approach to flow stress evaluation in hot deformation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, 53(3): 552-566.
- [48] HODGSON P D, KONG L X, DAVIES C H J. The prediction of the hot strength in steels with an integrated phenomenological and artificial neural network model[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 87(1): 131-138.
- [49] JI G, LI F, LI Q. A comparative study on Arrhenius-type constitutive model and artificial neural network model to predict high-temperature deformation behaviour in Aermet100 steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528: 4774-4782.
- [50] SABOKPA O, ZAREI-HANZAKI A, ABEDI H R. Artificial neural network modeling to predict the high temperature flow behavior of an AZ81 magnesium alloy[J]. *Materials & Design*, 2012, 39: 390-396.
- [51] HAGHDADI N, ZAREI-HANZAKI A, KHALESIAN A R. Artificial neural network modeling to predict the hot deformation behavior of an A356 aluminum alloy[J]. *Materials & Design*, 2013, 49: 386-391.
- [52] ABUEIDDA D W, KORIC S, SOBH N A. Deep learning for plasticity and thermo-viscoplasticity[J]. *International Journal of Plasticity*, 2021, 136: 102852.
- [53] SHROT A, BÄKER M. Is it possible to identify Johnson-cook law parameters from machining simulations[J]. *International Journal of Mater Form*, 2010, 3(1): 443-446.
- [54] 刘战强,张克国. J-C本构参数对绝热剪切影响的敏感性分析[J]. *航空学报*, 2011, 32(11): 2140-2146.  
LIU Zhanqiang, ZHANG Keguo. Sensitivity analysis of Johnson-cook material constants on adiabatic shear[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(11): 2140-2146.
- [55] PEREIRA J C, ARANZABE J, TABOADA M C. Analysis of microstructure and mechanical properties in As-built/As-cast and heat-treated conditions for IN718 alloy obtained by selective laser melting and investment casting processes[J]. *Crystals*, 2021, 11(10): 1196.
- [56] ÖZEL T, KARPAT Y. Identification of constitutive material model parameters for high-strain rate metal cutting conditions using evolutionary computational algorithms[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2007, 22(5): 659-667.
- [57] JASPERS S P F C, DAUTZENBERG J H. Material behaviour in conditions similar to metal cutting: Flow stress in the primary shear zone[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 122(2): 322-330.
- [58] MEYER H W, KLEPONIS D S. Modeling the high strain rate behavior of titanium undergoing ballistic impact and penetration[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 26(1): 509-521.
- [59] MOHOTTI D, ALI M, NGO T. Strain rate dependent constitutive model for predicting the material behaviour of polyurea under high strain rate tensile loading[J]. *Materials & Design*, 2014, 53: 830-837.
- [60] SHATLA M, KERK C, ALTAN T. Process modeling in machining. Part I: Determination of flow stress data[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(10): 1511-1534.
- [61] KLOCKE F, LUNG D, BUCHKREMER S. Inverse identification of the constitutive equation of inconel 718 and AISI 1045 from FE machining simulations[J]. *Procedia CIRP*, 2013, 8: 212-217.
- [62] BÄKER M. A new method to determine material parameters from machining simulations using inverse identification[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 31: 399-404.
- [63] AGMELL M, AHADI A, STÅHL J. Identification of plasticity constants from orthogonal cutting and inverse analysis[J]. *Mechanics of Materials*, 2014, 77: 43-51.
- [64] SUBRAMANIAN G, PRASANTH A, RAVEENDRA V V S. An algorithm for two- and three-dimensional automatic structured mesh generation[J]. *Computers & Structures*, 1996, 61(3): 471-477.
- [65] ZHANG Y, JIA Y, WANG S S Y. An improved nearly-orthogonal structured mesh generation system with smoothness control functions[J]. *Journal of Computational Physics*, 2012, 231(16): 5289-5305.
- [66] GARIMELLA R V. Mesh data structure selection for mesh generation and FEA applications[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2002, 55(4): 451-478.
- [67] XU K, CHEN G. Hexahedral mesh structure visualization and evaluation[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2019, 25(1): 1173-1182.
- [68] LU H, WU Y, CHEN S. A new method based on SOM network to generate coarse meshes for overlapping unstructured multigrid algorithm[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2003, 140(2): 353-360.
- [69] LÖHNER R, CAMBEROS J, MERRIAM M. Parallel unstructured grid generation[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1992, 95(3): 343-357.
- [70] LARWOOD B G, WEATHERILL N P, HASSAN

- O. Domain decomposition approach for parallel unstructured mesh generation[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2003, 58(2): 177-188.
- [71] ZHENG Z, GUO J, GAO R. Research on the cutting force and serrated chips in ultra-precision micro-grooving of SLM Ti6Al4V alloy[J]. *Micromachines*, 2023, 14(3): 533.
- [72] BERMUDO GAMBOA C, ANDERSSON T, SVENSSON D. Modeling of the fracture energy on the finite element simulation in Ti6Al4V alloy machining[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 18490.
- [73] 黄丽丽. 有限元三维六面体网格自动生成与再生成算法研究及其应用[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- HUANG Lili. Reach on the algorithm for 3D hexahedral mesh automatic generation and regeneration and its applications[D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [74] 杨振, 王洋, 王禹封. 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.
- YANG Zhen, WANG Yang, WANG Yufeng, et al. Application of 3D mesh dynamic refinement technology in cutting simulation[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2023, 55(1): 80-88.
- [75] 李宗旺. 基于Abaqus的二维切削仿真局部网格动态细化及前处理关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- LI Zongwang. Research on key techniques of local mesh dynamic refinement and preprocessing in 2D cutting simulation based on abaqus[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [76] LANGER U, MATCULEVICH S, REPIN S. Guaranteed error bounds and local indicators for adaptive solvers using stabilised space-time IgA approximations to parabolic problems[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2019, 78(8): 2641-2671.
- [77] TURCKE D J. Guidelines for selecting finite element grids based on an optimization study[J]. *Computers & Structures*, 1974, 4: 499-519.
- [78] ZHANG J, CHEROUAT A, BOROUCHE H. 3D adaptive remeshing procedure and its application to large deformation problems[J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 498: 199-209.
- [79] OHTSUBO H, KITAMURA M. Element by element a posteriori error estimation and improvement of stress solutions for two-dimensional elastic problems[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1990, 29(2): 223-244.
- [80] SHEN C, GAO S, WANG R. Hexahedral mesh adaptation based on posterior-error estimation[J]. *Engineering with Computers*, 2022, 38(5): 4337-4348.
- [81] DIVI S C, VAN ZUIJLEN P H, HOANG T. Residual-based error estimation and adaptivity for stabilized immersed isogeometric analysis using truncated hierarchical B-splines[J]. *Journal of Mechanics*, 2022, 38: 204-237.
- [82] BABUŠKA I, RHEINBOLDT W C. A posteriori error estimates for the finite element method[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1978, 12(10): 1597-1615.
- [83] BABUŠKA I, MILLER A. The post-processing approach in the finite element method-I: Calculation of displacements, stresses and other higher derivatives of the displacements[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1984, 20(6): 1085-1109.
- [84] BABUŠKA I, MILLER A. The post-processing approach in the finite element method-II: The calculation of stress intensity factors[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1984, 20(6): 1111-1129.
- [85] BABUŠKA I, MILLER A. The post-processing approach in the finite element method-Part 3: A posteriori error estimates and adaptive mesh selection[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1984, 20(12): 2311-2324.
- [86] LADEVEZE P, PELLE J P. Accuracy in finite element computation for eigenfrequencies[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1989, 28(8): 1929-1949.
- [87] 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.
- [88] FRIBERG P O. An error indicator for the generalized eigenvalue problem using the hierarchical finite element method[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1986, 23(1): 91-98.
- [89] WANG Z, YU T, BUI T Q. Numerical modeling of 3-D inclusions and voids by a novel adaptive XFEM[J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, 102: 105-122.
- [90] XING C, YU T, SUN Y. An adaptive phase-field model with variable-node elements for fracture of hyperelastic materials at large deformations[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 281: 109115.
- [91] DEHGHAN M, ABBASZADEH M. Error estimate of finite element/finite difference technique for solution of two-dimensional weakly singular integro-partial differential equation with space and time fractional derivatives[J]. *Journal of Computational and Applied*

- Mathematics, 2019, 356: 314-328.
- [92] BONNEY M S, EVANS R, ROUSE J. Goal oriented error estimation in multi-scale shell element finite element problems[J]. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 2021, 8(1):1-31.
- [93] 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 and Design*, 2014, 82: 46-61.
- [94] ZHANG J, CHEROUAT A, BOROUCHE H. 3D thermo-mechanical simulation coupled with adaptive remeshing for metal milling[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 698: 11-20.
- [95] VOELCKER H B, HUNT W A. The role of solid modelling in machining-process modelling and NC verification[J]. *SAE International Congress and Exposition*, 1981, 2: 1-8.
- [96] ZHENG F, HAN X, HUA L. A semi-analytical model for cutting force prediction in face-milling of spiral bevel gears[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 156: 104165.
- [97] NEHRING-WIRXEL J, TRETTNER P, KOBELT L. Fast exact booleans for iterated CSG using octree-embedded bSPs[J]. *Computer-Aided Design*, 2021, 135: 103015.
- [98] WANG W, LI Q, JIANG Y. A novel 3D surface topography prediction algorithm for complex ruled surface milling and partition process optimization[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107: 3817-3831.
- [99] LI J G, DING J, GAO D. Quadtree-array-based workpiece geometric representation on three-axis milling process simulation[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 50: 677-687.
- [100] CHAPPEL L T. The use of vectors to simulate material removed by numerically controlled milling[J]. *Comput Aided Design*, 1983, 15(3): 156-158.
- [101] WALSTRA W H, BRONSVOORT W F, VERGEEST J S M. Interactive simulation of robot milling for rapid shape prototyping[J]. *Computers & Graphics*, 1994, 18(6): 861-871.
- [102] LIU S Q, ONG S K, CHEN Y P. Real-time, dynamic level-of-detail management for three-axis NC milling simulation[J]. *Computer-Aided Design*, 2006, 38(4): 378-391.
- [103] ABDEL-MALEK K, YANG J, BLACKMORE D. On swept volume formulations: Implicit surfaces[J]. *Computer-Aided Design*, 2001, 33(1): 113-121.
- [104] BLACKMORE D, LEU M C, SHIH F. Analysis and modelling of deformed swept volumes[J]. *Computer-Aided Design*, 1994, 26(4): 315-326.
- [105] BLACKMORE D, LEU M C, WANG L P. The sweep-envelope differential equation algorithm and its application to NC machining verification[J]. *Computer Aided Design*, 1997, 29(9): 629-637.
- [106] SONAWANE H A, JOSHI S S. Analytical modeling of chip geometry in high-speed ball-end milling on-inclined inconel-718 workpieces[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2015, 137: 11001-11005.
- [107] CHIOU C J, LEE Y S. Swept surface determination for five-axis numerical control machining[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42(14): 1497-1507.
- [108] MA H, LIU W, ZHOU X. High efficiency calculation of cutter-workpiece engagement in five-axis milling using distance fields and envelope theory[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 1430-1447.
- [109] FLEISIG R V, SPENCE A D. Techniques for accelerating B-rep based parallel machining simulation[J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(12): 1229-1240.
- [110] LI Z, ZHU L. Envelope surface modeling and tool path optimization for five-axis flank milling considering cutter runout[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, 136: 41021.
- [111] ROTH D, BEDI S, ISMAIL F. Surface swept by a toroidal cutter during 5-axis machining[J]. *Computer-Aided Design*, 2001, 33(1): 57-63.
- [112] STRENOWSIKI J S, CARROLL J T. An orthogonal metal cutting model based on an eulerian finite element method, manufacturing process, machines and systems [C]//*Proceedings of 13NSF Conference in Production Research and Technology*. [S.l.]:NSF, 1986: 261-264.
- [113] HERBERT S, KLAUS B. Optimization of precision machining by simulation of the cutting process[J]. *Annals of CIRP*, 1993, 32(1): 55-58.
- [114] GONG Z, SINGH M, WEI D. An advanced technique for determining NC machining tool path to fabricate drawing die surface considering non-uniform thickness distribution in stamped blank[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111: 1445-1455.
- [115] WANG L, YUAN X, SI H. A cutting force model based on compensated chip thickness in five-axis flank milling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104 (1/2/3/4) : 1413-1423.
- [116] LEI H, CHENG J, YANG D. Effect of pre-existing micro-defects on cutting force and machined surface quality involved in the ball-end milling repairing of flawed KDP crystal surfaces[J]. *Materials*, 2022, 15

- (21): 7407.
- [117]ZHANG X, EHMANN K F, YU T. Cutting forces in micro-end-milling processes[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 107: 21-40.
- [118]MA C, MA J, SHAMOTO E. Analysis of regenerative chatter suppression with adding the ultrasonic elliptical vibration on the cutting tool[J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(2): 329-338.
- [119]ZHOU G, LU Q, XIAO Z. Cutting parameter optimization for machining operations considering carbon emissions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208: 937-950.
- [120]LAI M, ZHANG X D, FANG F Z. Study on critical rake angle in nanometric cutting [J]. *Applied Physics A*, 2012, 108(4): 809-818.
- [121]龚智鹏. 基于Abaqus的铣削仿真前处理关键技术研究及二次开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017. GONG Zhipeng. Study on the key technologies of pre-treatment of milling simulation with Abaqus and redevelopment [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [122]YU H, LI S J, LIU Y X. Finite element simulation for residual stresses in welding process[J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 353-358: 1915-1918.
- [123]ELHORINY M, WENZELBURGER M, KILLINGER A. Finite element simulation of residual stress development in thermally sprayed coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26(4): 735-744.
- [124]SUN F, LI Y, FU Y. Study on the influence of laser power variation on the temperature field of laser additive manufacturing airport fuel supply pipe network [J]. *Optik*, 2020, 221: 165301.
- [125]LI W, YU R, HUANG D. Numerical simulation of multi-layer rotating arc narrow gap MAG welding for medium steel plate [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 45: 460-471.
- [126]LI J, ZHOU X, BROCHU M. Solidification microstructure simulation of Ti-6Al-4V in metal additive manufacturing: A review [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 31: 100989.
- [127]SUN Y, YAN C, WU S. Geometric simulation of 5-axis hybrid additive-subtractive manufacturing based on Tri-dexel model [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 99 (9/10/11/12): 2597-2610.
- [128]WEBER D, KIRSCH B, CHIGHIZOLA C R. Investigation on the scale effects of initial bulk and machining induced residual stresses of thin walled milled monolithic aluminum workpieces on part distortions: Experiments and finite element prediction model [J]. *Procedia CIRP*, 2021, 102: 337-342.
- [129]ZHANG Y, QIAO H, ZHAO J. Research on the mechanism of micro-water jet-guided laser precision drilling in metal sheet [J]. *Micromachines*, 2021, 12(3): 343.
- [130]AWAN W S, MABROUKI T. Numerical and experimental investigations of post-machining distortions in thin machined structures considering material-induced residual stress [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2017, 39(2): 509-521.
- [131]龚智鹏, 苏宏华, 何临江. 2124铝合金桁梁薄壁件铣削变形仿真优化 [J]. *机械制造与自动化*, 2018, 47(3): 149-152. GONG Zhipeng, SU Honghua, HE Linjiang. Simulation of milling deformation of 2124 Aluminum thin-wall truss beam structure and its process optimization [J]. *Mechanical Manufacturing and Automation*, 2018, 47(3): 149-152.

(编辑:陈珺)