

切削过程有限元仿真研究进展*

张松^{1,2}, 李斌训^{1,2}, 李取浩^{1,2}, 满佳^{1,2}

(1. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061;
2. 山东大学机械工程国家级实验教学示范中心, 济南 250061)

[摘要] 得益于高性能计算机和软件技术的发展, 数值仿真为深入理解切削过程、研究刀具磨损、提高加工表面质量等提供了强大的技术支持。总结了现有几种本构模型的特点, 对构建切削仿真有限元模型中的几个关键问题进行了分析和总结, 综述了有限元仿真技术在金属切削过程中切屑形成研究、切削温度和切削力、刀具磨损、刀具优化和残余应力预测以及加工表面显微组织演变模拟等方面的研究成果。最后, 系统地分析了切削过程有限元仿真研究中存在的问题, 探讨了该研究领域未来的发展趋势和需要进一步探索的热点问题。

关键词: 有限元仿真; 切屑形成; 切削力及切削温度; 残余应力; 表面质量

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.13.014



张松

教授, 博士生导师, 山东省泰山学者特聘专家, 长期从事高效切削加工机理及相关技术研究, 负责多项国家级和省部级科研课题。获得省级科技进步二等奖 2 项, 发表研究论文 100 余篇, 授权发明专利 4 项。

目前, 切削加工依然是金属材料成形的重要工艺之一。零件的表面质量与工艺系统、加工参数、刀具参数(几何结构、涂层材料等)和冷却润滑条件密切相关。如何在切削过程中获得满足兼顾加工质量与生产成本的工艺条件, 一直是制造业和学术界关注的重要问题。传统的试验研究需要占用大量的时间, 消耗过多的人力、物力和财力, 给企业造成很大的负担; 并且, 试验研究结果缺乏普适性和实时性。

近些年, 得益于高性能计算机和软件技术的发展, 有限元仿真技术在切削领域得到了广泛的应用, 为研究切屑形成机理, 预测切削温度、切削力和残余应力以及加工表面显微组织演变等提供了支持。目前, 用于切削仿真的主流有限元软件包括 Abaqus/Explicit、Deform、AdvantEdge、Ansys/LS-DYNA 和 Marc 等。以材料本构模型为基础, 通过构建切削仿真模型, 可以准确地对切削过程中应

力、应变、应变率、切削力和切削温度等物理量进行定量分析, 进而为研究刀具磨损、加工表面完整性和工艺优化提供了参考数据。切削过程中, 切削变形区的材料在热-力耦合载荷作用下会发生显微组织的演变(塑性变形、晶粒细化、位错增殖、相变等)和物理力学性能(硬度、屈服强度等)的改变, 对零件毛坯已经具有的特定组织和性能产生不利影响, 最终影响零件的使用寿命。目前, 试验观测是分析显微组织的主要手段, 其缺点是需要制备金相试样, 破坏已加工零件, 并且周期长, 更为重要的是无法对显微组织演变进行实时观测。借助有限元软件预留的二次开发接口, 可以将基于显微组织演变的模型以用户自定义子程序的形式嵌入到有限元软件中, 对切削过程中显微组织进行动态模拟和定量预测。

有限元仿真技术在切削加工领域的广泛使用, 为实现“形性协同制造”提供了理论和技术支持。本文主

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51575321); 山东省重大科技创新工程(2018CXGC0804); 山东省泰山学者工程专项(ts201712002)。

要从本构模型、切削仿真模型建立、切屑形成、切削力和切削温度预测、残余应力预测、加工表面显微组织演变模拟6个方面进行综述,总结分析了目前切削过程有限元仿真的研究进展,并提出了下一步需要解决的问题。

材料的本构模型

材料的本构模型是构建有限元模型的前提条件,本构关系的精确与否直接关系到有限元仿真结果的准确性。利用有限元法对切削过程进行仿真,旨在最大程度接近真实切削条件并对结果进行预测,从而提高加工质量和效率,降低加工成本和时间提供理论和技术支持。因此,选择或建立符合材料自身属性的本构关系方程对切削仿真至关重要。目前应用较为广泛的材料本构模型主要有以下几种:Johnson-Cook (J-C)^[1]及修正J-C本构模型^[2-4]、Zerilli-Armstrong (ZA)模型^[4]、Maewaka模型^[5]、Nemat-Nasser细观模型^[6-7]、Power-Law模型^[8]等。其中,J-C本构模型是切削仿真中应用最为广泛的材料模型,J-C本构方程的参数通常是借助霍普金森压杆(Split Hopkinson Press Bar, SHPB)试验,对不同温度和不同应变率条件下获得的数据进行拟合计算得到。

1 Johnson-Cook (J-C) 及修正 J-C 本构模型

Johnson-Cook本构方程是切削仿真中应用最广泛的材料流动应力(σ)模型,它是关于应变(ε)、应变率($\dot{\varepsilon}$)和温度(T)的函数,其表达式如下:

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

式中,参数 A 、 B 、 n 、 C 和 m 分别表示材料初始屈服强度、硬化模量、应变

硬化指数、应变率敏感系数和热软化系数; T_r 和 T_m 分别表示参考温度(通常指室温)和材料熔点温度。

虽然J-C本构模型在切削仿真中得到了最为广泛的应用,但是该本构模型仍然存在明显不足。一是该模型并不适合于描述所有材料的流动应力行为,有其局限性;二是J-C模型并没有考虑应变、应变率和温度场之间相互耦合的作用。事实上,在切削加工过程中,特别是高速加工,剧烈的塑性变形伴随着较高的切削温度和应变率,机械-热耦合物理场非常明显。因此,为了更准确描述切削过程中材料的塑性流变性,部分学者在J-C本构模型的基础上,对模型进行了不同程度的修正。在Andrade-Meyers提出的修正J-C模型中^[2],将高于动态回复/再结晶温度的材料流变应力项 $H(T)$ 引入J-C模型,如式(2)所示:

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

在Andrade-Meyers的修正J-C模型中, $H(T)$ 项的具体表达形式为:

$$H(T) = \frac{1}{1 - [1 - ((\sigma_f)_{rec}/(\sigma_f)_{def})] u(T)} \quad (3)$$

式中,

$$\begin{cases} u(T) = 0 & T < T_c \\ u(T) = 1 & T > T_c \end{cases} \quad (4)$$

同样的,Calamaz等^[3]也对J-C模型进行了修正,建立了TANH修正J-C本构模型,将高应变率和高温度下的流动应力软化加以考虑,如式(5)所示:

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

$$\left(D + (1 - D) \tanh \left(\frac{1}{(\varepsilon + S)^c} \right) \right) \quad (5)$$

在该修正模型中, $D=1-(T/T_m)^d$, $S=(T/T_m)^b$ 。

对比原始的J-C本构模型,TANH修正模型综合考虑了应力-应变-应变率-温度之间的耦合效应,在应变硬化项中添加了应力软化项,一旦应变值达到或超过临界应变,材料将发生软化现象。借助TANH修正J-C模型,Li等^[4]对钛合金切削过程中的切屑形成进行仿真预测,充分证明了TANH修正模型的重要性和准确性。Özel等^[5]还将该模型用于刀具磨损研究。尽管TANH修正J-C模型将材料的软化效应考虑在内,但并没有对材料发生动态再结晶行为时的应力-应变-应变率-温度情况予以考虑。

此外,Umbrello等^[6]将材料硬度变化对流动应力的影响引入J-C本构方程,为:

$$\sigma = (A + F + G\varepsilon + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T - T_m} \right)^m \right] \quad (6)$$

在修正模型中,参数 F 和 G 是关于材料硬度的函数。

2 Zerilli-Armstrong (ZA) 模型

Zerilli和Armstrong^[7]构建了基于位错力学理论,同时考虑晶体结构的材料本构模型。对于晶体结构分别为体心立方(BCC)和面心立方(FCC)的材料,其对应的本构模型如下:

$$\sigma = \begin{cases} C_0 + C_1 \exp(-C_3 T + C_4 T \ln(\dot{\varepsilon})) + C_2 (\bar{\varepsilon})^n & (\text{BCC}) \\ C_0 + C_2 (\bar{\varepsilon})^n \exp(-C_3 T + C_4 T \ln(\dot{\varepsilon})) & (\text{FCC}) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $C_0 \sim C_5$ 和 n 是与材料有关的经验常数,一般通过试验获得。

3 Nemat-Nasser细观模型

在Nemat-Nasser等^[8-9]提出的细观模型中,应变率和温度对流动应力的影响被看作是热激活应力 σ^*

(Thermally activated stress), 而位错密度、晶格对位错运动的阻力、滑移体系、亚晶粒滑移以及晶界滑移等微观组织对应力的影响用热应力 σ_a (Thermal stress) 来表示。因此, 该流动应力模型可以表示为:

$$\sigma = \sigma^* + \sigma_a = \sigma_0 \varepsilon^n +$$

$$\sigma \left\{ 1 - \left[-\frac{k}{G_0} T \left(\ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right]^{1/q} \right\}^{1/p} \quad (8)$$

式中, k 是波兹曼常数, G_0 是总能垒, p 和 q 是常数, 且 $0 < p < 1, 1 < q < 2$ 。

4 Power-Law 模型

Power-Law 模型, 即幂律模型^[10]。幂律本构模型认为材料的塑性变形流动应力与等效应变、应变速率和温度之间存在如式(9)所示函数关系:

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^m \quad (9)$$

式中, σ_0 、 ε_0 和 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别代表初始应力值、参考应变和参考应变率。 m 是指温度敏感系数, 与材料有关。

除了上述提到的比较常见的材料本构模型外, 还有 Oxley 本构模型^[11-12], Baumann-Chiesa-Johnson (BCJ) 本构模型^[13] 以及 Maekawa 模型^[14] 等。由于这些模型应用较少, 故本文不再作详细阐述。

切削仿真有限元模型的构建

通过建立符合实际加工的切削仿真模型, 并有效地整合到工艺规划与优化过程中, 可以减少或避免重复性的试验工作, 实现提高生产效率和控制产品质量的目的。目前, 构建的切削仿真模型多以正交二维车削为研究对象。

1 网格划分方法

目前, 有限元模型网格划分技术主要分为以下几种: 修正拉格朗日 (Updated Lagrangian) 算法^[15]、欧拉 (Eulerian) 算法^[16]、自适应拉格朗日-欧拉 (Arbitrary-Lagrangian-Eulerian, ALE) 算法^[17] 和欧拉-拉格朗日 (Coupled-Eulerian-Lagrangian, CEL) 综合法^[18]。拉格朗日法是观察粗变形的优先选择, 对于切削过程中主要剪切区产生的大变形, 运用拉格朗日法会影响仿真结果。欧拉算法虽然能够解决切削过程中材料产生的大变形, 但是边界条件需要提前设定。自适应拉格朗日-欧拉算法和欧拉-拉格朗日综合法则可以避免大变形引起的网格畸变报错问题, 同时还可满足边界条件要求, 通常用在稳态切削过程中。图 1^[4,19] 为采用不同网格划分算法的有限元模型。

2 分离准则

在切削仿真过程中, 如何尽可能

贴近实际切削过程描述切屑与工件基体的分离, 会直接影响仿真结果的准确性^[20-21]。分离原则选取的不当, 可能会引起仿真过程不收敛甚至报错。用来描述切屑与工件基体分离的准则主要分为两种: 第 1 种是几何准则^[22-23], 通过判断切削路径上刀尖点与位于刀尖前单元节点之间的距离是否达到设定的临界失效值。一旦该距离达到预先设定的临界失效值, 此节点就会断裂分离成两个节点, 一个跟随形成的切屑继续流动, 另一个节点则保留在加工表面, 如图 2 所示; 第 2 种是物理准则^[24-28], 以等效塑性应变、断裂应力、应变能密度等物理变量作为实现切屑与工件基体分离的标准。同样的, 当刀尖点处的物理变量达到设定的临界值时, 单元节点发生分离, 即生成切屑。

Cockroft 等^[25] 将归一化最大主应力对有效应变的积分作为分离准则, 提出 Cockroft-Latham (C-L) 断裂准则:

$$D_{cr} = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \bar{\sigma} \left(\frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\varepsilon} \quad (10)$$

式中, ε_f 是断裂时的总应变, $\bar{\sigma}$ 是有效应力, $\bar{\varepsilon}$ 是有效应变, σ^* 是最大拉伸应力。

Hillerborg 等^[26] 根据单位面积断裂所需的能量提出了基于断裂能

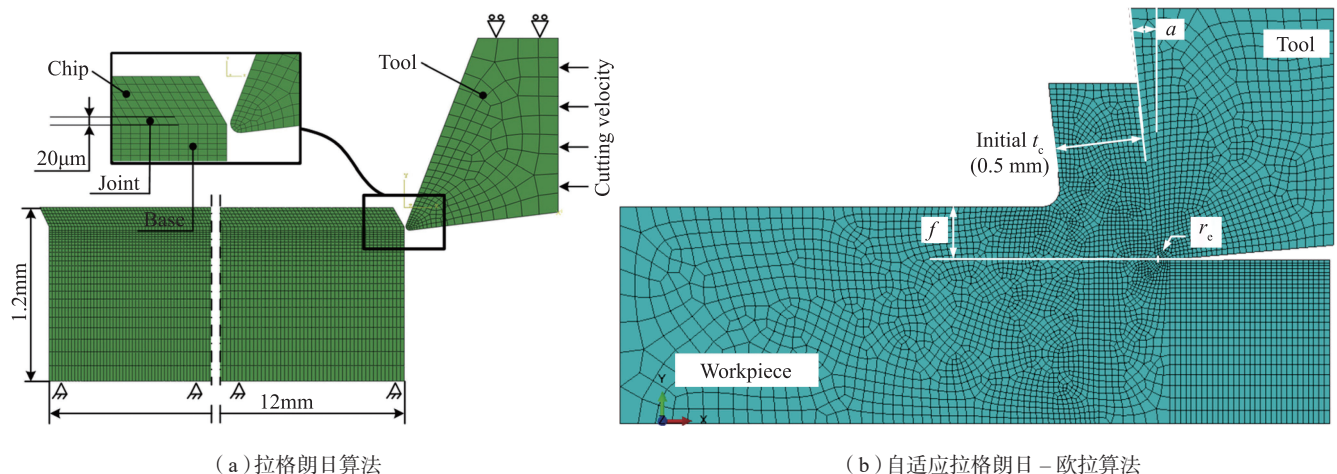


图1 有限元模型网格划分
Fig.1 Finite mesh elements generation

的分离准则:

$$G_f = \int_{\bar{\varepsilon}_{ni}}^{\bar{\varepsilon}_f} L \bar{\sigma}_d d\bar{\varepsilon} = \int_0^{\bar{u}_f} \bar{\sigma}_y d\bar{u} \quad (11)$$

式中, L 是单元长度, \bar{u}_f 是当断裂能与屈服应力共轭时的等效塑性位移。

J-C 模型分离准则是综合考虑应变硬化、应变率和温度的函数^[29]。当定义的损伤参数 D 值为 1 时, 单元被认定为失效并删除, 如下式:

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_f^{pl}} \quad (12)$$

式中, $\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}$ 是等效塑性应变增量, $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ 是单元失效时等效塑性应变, 其表达式为:

$$\varepsilon_f^{pl} = [d_1 + d_2 \exp(-d_3) \eta] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\varepsilon^{pl}}{\varepsilon_0} \right) \right] (1 - d_5 \theta) \quad (13)$$

式中, $d_1 \sim d_5$ 是通过试验获得的损伤参数。

3 摩擦模型

在切削过程中, 刀具和加工工件之间会发生剧烈的摩擦行为, 主要包括两个摩擦对: 前刀面与流动切屑之间的摩擦和后刀面与已加工表面之间的摩擦, 如图 3 所示。对于前刀面与切屑之间的接触, Zorev^[30] 认为存在粘结区和滑动区, 作用在前刀面上的法向应力和摩擦应力沿前刀面的分布规律如图 4 所示。在粘结区, 认为剪应力是固定值, 与材料的屈服应力相等; 在滑动区, 摩擦系数 μ 为常数, 满足库伦摩擦定律^[31]。在切削仿真过程中, 研究人员普遍采用该摩擦模型。

$$\tau = \begin{cases} \mu\sigma & \mu\sigma < \tau_{crit} \quad (\text{滑动区}) \\ \tau_{crit} & \mu\sigma \geq \tau_{crit} \quad (\text{粘结区}) \end{cases} \quad (14)$$

式中, τ_{crit} 是剪应力, τ 是摩擦应力, σ 是法向应力。

有限元仿真在切削过程中的应用

1 切屑形成

金属的切削过程与切屑的形成

机理是紧密联系在一起。根据切屑形貌特征, 一般将切屑分为 4 种类型^[31]。通过对切屑形成机理的研究, 有助于优化切削参数, 减小刀具磨损和保证加工质量, 同时降低加工成本。在金属切削过程中, 由于锯齿状切屑会对切削力、刀屑接触区温度

场、加工表面质量以及切削系统动态行为造成影响^[32-34]。因此, 研究人员将更多的精力集中在对锯齿状切屑的形成机理以及锯齿状切屑对切削过程的影响研究等方面, 特别是对钛合金、镍基合金、铝合金以及淬硬钢等应用广泛的金属材料。Jomaa

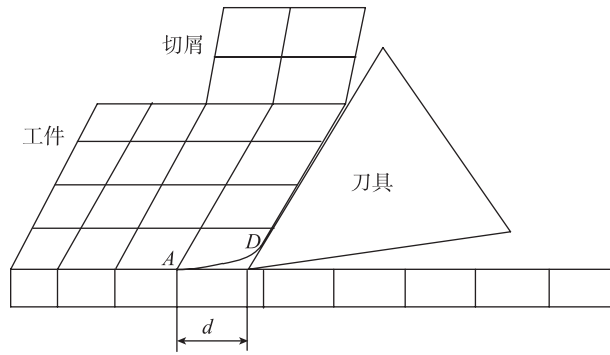


图2 几何分离准则

Fig.2 Geometric separation criterion

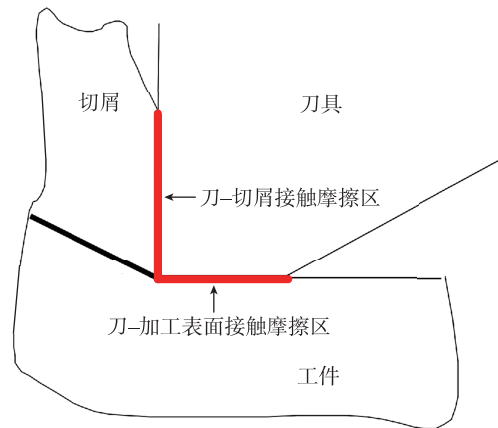


图3 切削加工摩擦区示意图

Fig.3 Illustration of friction area in cutting process

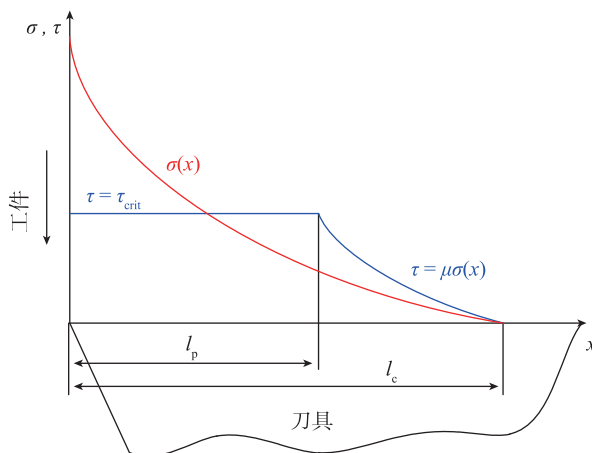


图4 前刀面法向应力与摩擦应力分布

Fig.4 Stress distribution of normal stress and friction stress on rake face

等^[35]借助有限元模拟,揭示了高速切削铝合金 AA7075-T651 过程中锯齿状切屑的形成机理(图 5^[35]),认为刀尖处的局部剪切应变向自由表面扩展是锯齿状切屑形成的主要原因。他们同时指出,在锯齿状切屑形成过程中,切削力的减小是第一变形区材料发生热软化的结果。Wang 等^[36]借助霍普金森压杆试验对 SKD11 钢的 J-C 本构模型进行了修正,成功预测了不同切削速度下锯齿状切屑形貌。借助离散单元法,He 等^[37]构建了多相材料的切削有限元模型,研究发现石墨球变形程度要大于铁素体,并且切屑形成主要受微观组织和切削速度的影响,如图 6^[37]所示。基于断裂能理论,Zhang 等^[38]开发了用户自定义摩擦模型 VFRIC,并将其嵌入到切削仿真模型中,实现了切屑形貌预测。利用提出的新模型,分析了切削速度、摩擦系数和刀具前角对切屑形貌的影响。为了研究刀尖圆弧半径对切屑形貌的影响,Zhang 等^[39]利用 Abaqus/Explicit 建立了三维切削模型,切屑形貌仿真结果与试验吻合度较好,如图 7^[39]所示。Ye 等^[40]研究了包括 IN 100、Ti-6Al-4V、AISI 4140 钢以及 Al7050 材料在内的锯齿状切屑几何参数,通过数据分析,一个表征惯量、热软化、应变硬化、弹性卸载、黏性扩散和热扩散之间竞争的无量纲系数决定了锯齿切屑的萌生。哈尔滨理工大学岳景旭等^[41]仿真分析了锋利刀刃、倒圆刀刃和倒棱刀刃对锯齿切屑形成过程的影响,有限元仿真结果显示刃口形式对切削过程影响显著。大连理工大学李嫚等^[42]通过有限元模拟镍基高温合金切屑形成,将锯齿切屑的形成分成 3 个阶段,认为锯齿切屑是由剪切滑移基块和窄带组成。鉴于切屑的形成与材料的损伤和扩展是紧密联系的,而损伤的萌生取决于应力、应变、应变率和温度。因此,如何在切削仿真过程中更为合理地选用断裂准则来描述切屑形成仍

需要研究人员进一步研究。

2 切削温度及切削力

有限元法作为一种有效的分析工具,被广泛应用于切削力和切削温度的预测。有关切削速度、进给量、切削深度等切削参数对切削温度、切

削力的影响,研究人员已经进行了大量的研究,并取得了丰富的成果。Özel 等^[5]研究了不同涂层刀具在车削钛合金过程中对切削力和切削温度的影响,如图 8^[5]所示。Saez-de-Buruaga 等^[43]利用有限元仿真,分析

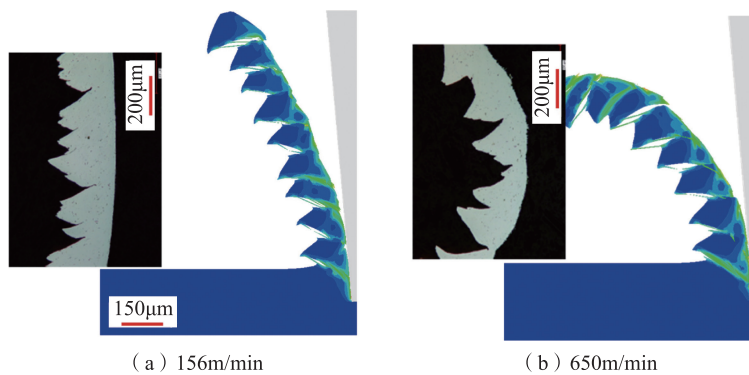


图5 锯齿状切屑仿真与试验结果对比
Fig.5 Comparison of simulated and experimental serrated chip morphology

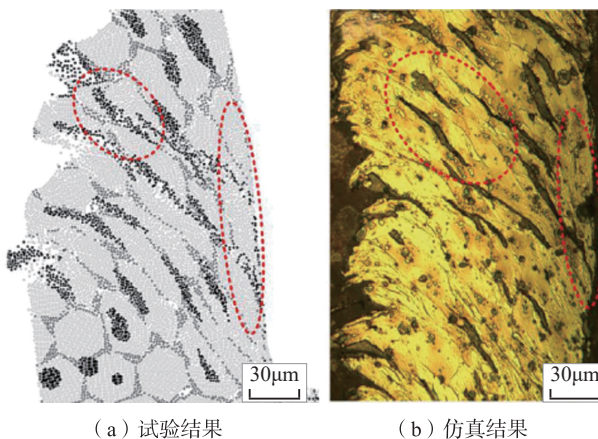


图6 微观组织变形仿真结果与试验结果对比
Fig.6 Comparison of simulated and experimental microstructure evolution in chip

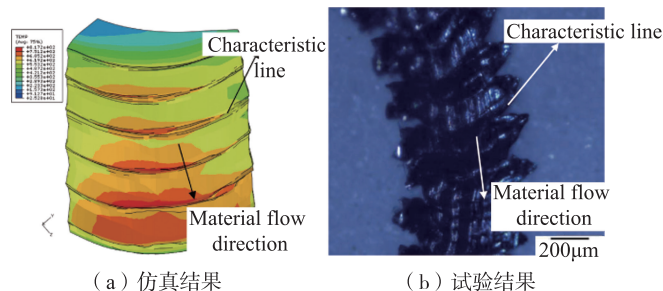


图7 切屑三维仿真结果与试验结果对比
Fig.7 3D comparison of simulated and experimental chip

了材料微观组织对前刀面切削温度的影响,并与试验值、理论计算值相比较,平均误差在 12% 左右,结果具有较好的一致性。在铣削 AISI D2 钢时, Lima 等^[44]建立了三维铣削有限元模型,并将获得的预测值与通过热电偶法测得的试验值相互验证,证明了有限元模型和热电偶法的可靠性。此外,他们的研究结果表明切削温度随着切削速度、进给量、轴向和径向切削深度的增加而增大,但是影响程度存在不同。在切削过程中,影响切削温度的参数众多,有时有限元软件不足以提供所需要的摩擦模型、热交换模型等条件。因此, Akbar^[45]和 Courbon 等^[46]借助有限元软件提供的二次开发接口,开发了依赖于切削速度的热分配系数用户自定义子程序 VUINTER,嵌入到切削仿真模型中,使得流入刀具的热流量仿真值与通过试验 / 理论混合法获得的数值非常接近,如图 9^[45]和图 10^[46]所示。同时也指出,进给力仿真值小于试验值。类似的, Courbon 等^[47]开发了依赖于切削速度的摩擦模型

用户子程序,考虑了切削速度对摩擦因子的影响。为了准确预测切削力,可靠的流动应力模型是基本前提。在对 AISI H13 钢切削建模仿真过程中, Umbrello 等^[48]将材料硬度引入流动应力模型。Ding 和 Shin^[19]将微观组织演变模型与切削仿真的热-力场进行耦合,结果表明切削力与试验值之间的误差要小于纯热力耦合场条件下的相对误差。西北工业大学沈雪红和王哲^[49]借助 Abaqus 仿真软件模拟了车削钛合金过程中切削力和切削温度场的变化规律,试验验证的三维切削模型可以为加工提供省时、减耗的便利途径。清华大学冯平等^[50]提出了一种人工热电偶和有限元热仿真相结合的测量刀尖温度的方法,为刀尖温度测量提供了一种新的准确可靠的方法。综上所述,针对切削温度和切削力的预测取得了一定的成果,但是仍有一些问题需要解决,主要集中在摩擦模型的构建和选取、刀具涂层热力学参数的匹配以及热传导等热损耗问题。

3 刀具磨损

在切削过程中,刀具磨损无法避免,而刀具的磨损又是造成工件表面质量下降的重要因素之一。因此,预测刀具磨损对于实现刀具切削性能最大化和生产成本最小化而言是一项非常重要的任务。Atanasio 和 Umbrello^[51]将构建的基于磨粒-扩散机制的刀具磨损模型以自定义子程序的方式嵌入到三维有限元仿真软件中,实现了对车削 AISI 1040 钢过程中刀具磨损的准确预测。利用该磨损模型,成功对发生在初始切削阶段的磨粒磨损和稳定切削阶段的扩散磨损进行了预测。基于 Usui 粘着磨损模型,以有限元仿真中刀-屑界面温度、正应力和材料流动速度为输入量,以刀具磨损速率为输出量,Özel 等^[5]研究了不同涂层刀具在干式切削 Ti-6Al-4V 过程中前刀面和后刀面的刀具磨损速率,如图 11^[5]所示,仿真和试验结果对比表明, cBN 涂层的 WC/Co 硬质合金刀具磨损量最小,更适合钛合金 Ti-6Al-4V 的干式切削。通过研究钛合金 Ti-6Al-4V 的微铣削过程, Özel 等^[52]进一步验证了 cBN 涂层刀具磨损速率小(图 12^[52]),切削性能优越的特点。通过建立的三维车削有限元模型, Lotfi 等^[53]利用修正的 Usui 磨损率模型分别预测了传统车削、旋转车削和超声辅助旋转车削过程中刀具的磨损情况,结果表明超声辅助旋转车削中刀

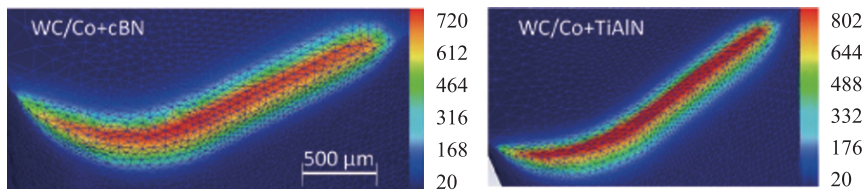


图8 刀具涂层对仿真温度场分布的影响

Fig.8 Effect of tool coating on simulated temperature distribution

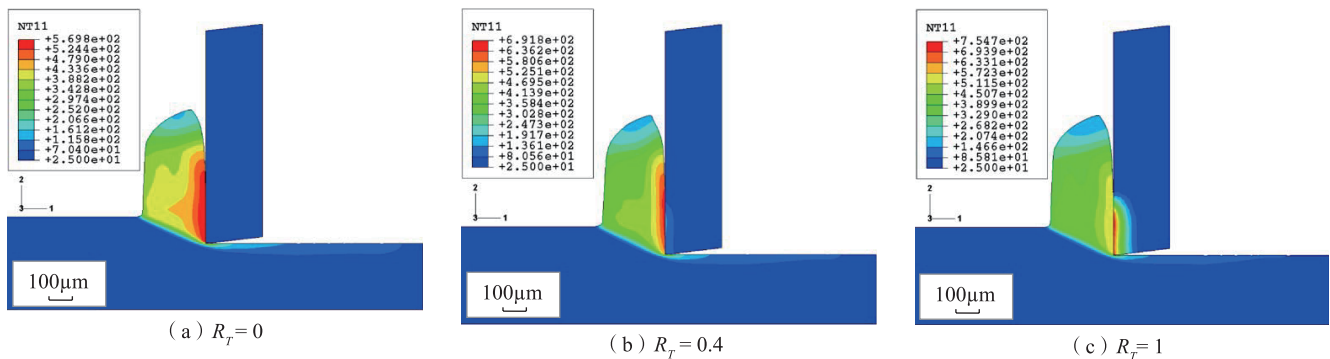


图9 热分配系数对切削温度的影响

Fig.9 Effect of heat partition coefficient on cutting temperature

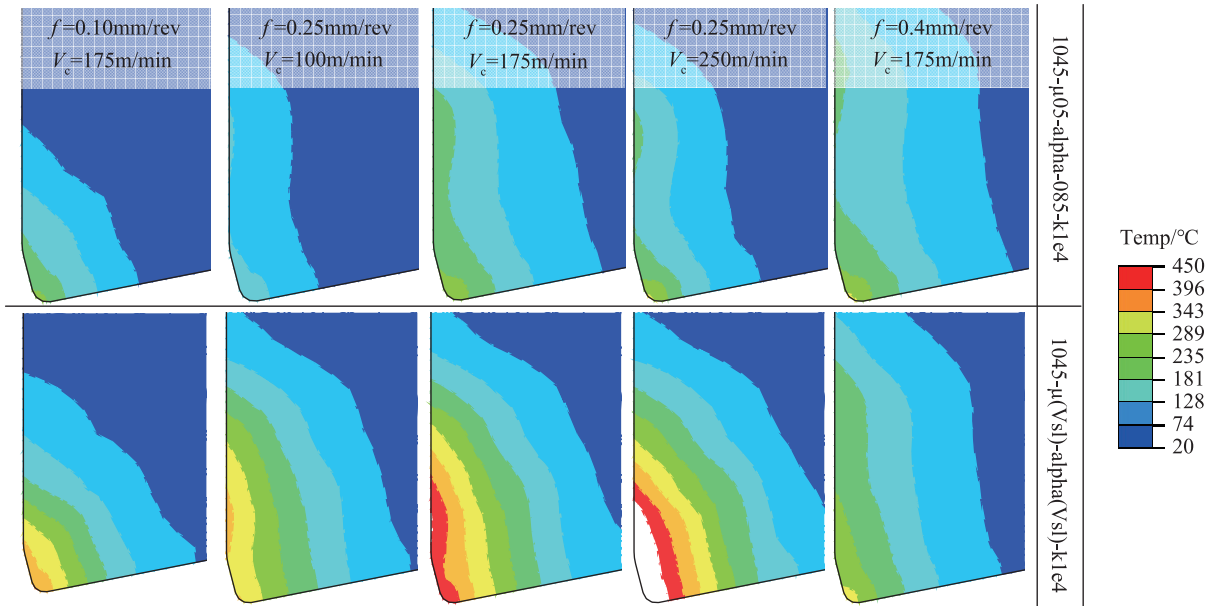


图10 热分配系数对刀具温度场分布的影响
Fig.10 Effect of heat partition coefficient on tool temperature

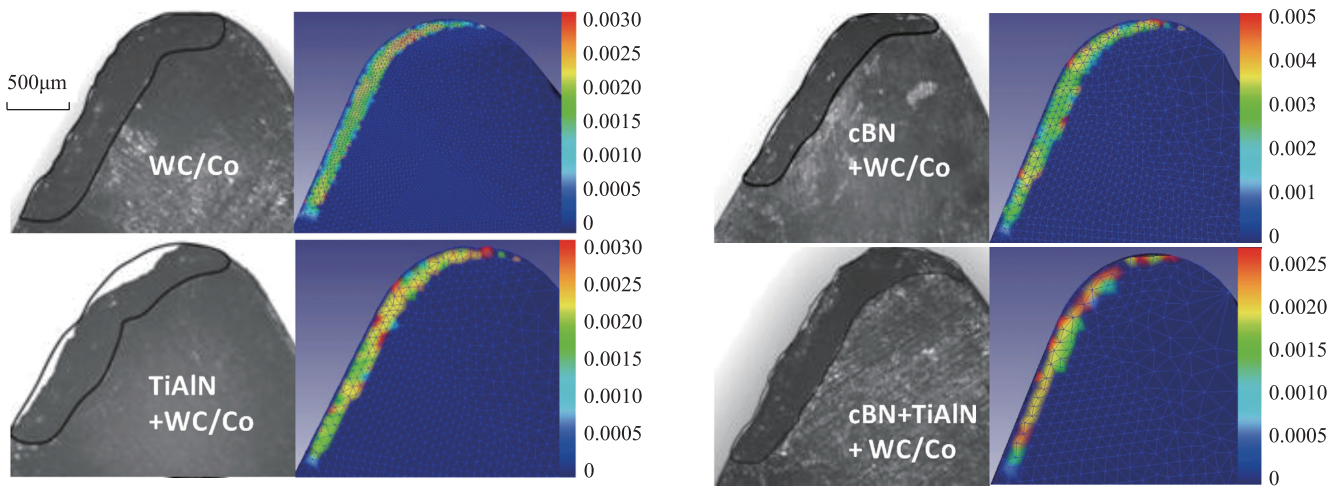


图11 试验与仿真刀片磨损速率比较
Fig.11 Comparison of the predicted tool wear rate with experimental results

具磨损速率最小,表面粗糙度最小。Calamaz 等^[54]构建了切削钛合金 Ti-6Al-4V 的光滑粒子流体动力学模型,仿真结果表明刀具磨损主要是刀尖形状发生变化。通过开发用户自定义子程序, Binder 等^[55]提出了一种预测刀具磨损的新模型,即以参与切削区域节点的移动实现几何表示的刀具磨损扩展。东北大学马廉洁等^[56]在 DEFORM 中研究了切削速度、切削深度和刀具路径对刀具磨

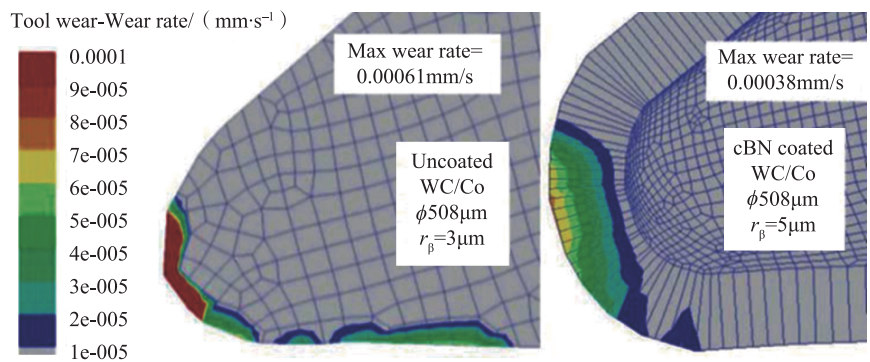


图12 有限元仿真涂层和未涂层刀具磨损率对比
Fig.12 Comparison of tool wear rate between coated and uncoated tool

损的影响,仿真结果指出刀具磨损随刀具路径可以分为初期磨损、正常磨损和剧烈磨损3个阶段。同样借助 DEFORM 仿真软件,沈阳航空航天大学马书娟等^[57]在 Coulomb 摩擦定律的基础上构建了刀具磨损模型分析切削参数对刀具磨损的影响。显然,通过揭示刀具在切削过程中的磨损特性对于提高工件质量,降低加工成本和优化工艺参数具有重要意义。

4 刀具优化

切削刃微观几何结构会对刀具磨损产生直接影响,进而影响切削力和切削温度,最终影响刀具寿命、工艺稳定性和表面质量。因此,学者们通常选用不同的切削刃处理方式避免刀具崩刃,改善刀-件摩擦行为和表面质量。2013年, Yussefian 等^[58]提出了利用参数二次方建模表征对称和非对称钝圆切削刃的方法,为优化设计刀具几何结构提供了依据。通过建立的切削刃三维有限元模型, Özel^[59]仿真了钝圆、倒棱和变钝圆半径切削刃在切削过程中的温度场、应力场和磨损情况,分析结果表明变钝圆半径的切削刃可以减少热产生、避免应力集中和减缓刀具磨损,有利于延长刀具寿命。图 13^[59]展示了具有不同切削刃几何结构的刀具。当切削厚度为 0.02mm 时, Fulemova 等^[60]研究了切削刃钝圆半径为 5 μm 、10 μm 和 15 μm 的刀具切削性能,试验结果发现钝圆半径为 15 μm 时可以获得最长的刀具寿命、最低的表面粗糙度和切削力。Denkena 等^[61]以前刀面和后刀面切削刃弧长 S_y 和 S_a 表征钝圆刀刃,通过有限元仿真发现后刀面切削刃弧长 S_a 对切削热载荷影响更为显著,仿真结果可以为设计具有合理形状和尺寸的刀具提供借鉴。Biermann 等^[62]同样利用有限元模型对具有不同前刀面和后刀面弧长的切削刃几何进行了分析和优化。刘献礼等^[63]

将刀具设计、切削条件以及刀具切削性能三者综合考虑,提出了刀具“形-性-用”一体化设计方法。借助 DEFORM-3D 构建的铝合金车削有限元模型,张蓉蓉等^[64]分析了刀具几何角度和刀尖圆弧半径对切削力和切削温度的影响。可以看出,有限元仿真作为刀具微观几何结构参数优化的重要工具,确实为刀具设计提供了理论依据和技术支持。需要注意的是,刀具优化设计还应结合实际切削过程中切削用量、加工质量、生产效率等方面的因素。

5 残余应力

加工工件内残余应力的存在会对裂纹的萌生、增殖以及零件的最终失效造成潜在威胁。由于对残余应力的试验测量及模型仿真较为困难,造成研究结果之间也存在差异性,有些学者报道表面残余应力是拉应力^[65],而有些学者认为是残余压应力^[66]。对于加工表层拉应力的产生,普遍接受是产生的切削热引起热膨胀;而对于压应力的产生,主要是因为机械载荷造成的塑性变形。在切削 AISI 316 不锈钢过程中, Maranhão 等^[67]研究了进给量和前刀角对残余应力的影响,残余压应力随着进给量的增加和前刀角的减小

而增大。Arrazola 等^[68]则建立了三维车削模型,对 3 个方向的应力 σ_{11} 、 σ_{13} 和 σ_{33} 进行了有限元仿真分析,得到的残余应力模拟值与测量值一致性较好。同样利用三维有限元模型, Özel 等^[69]对钛合金 Ti-6Al-4V 和镍基合金 IN 100 进行了切削仿真,研究了刀具几何和刀具涂层对残余应力分布的影响,结果表明压应力值随着刀刃半径的增加而增大,而当刀具为涂层刀具时,加工表面残余应力逐渐向拉应力转变。借助三维切削模型, Arrazola 等^[70]对镍基合金 IN 718 切削过程中残余应力的分布进行了有限元模拟,仿真结果如图 14^[70]所示。Schulze 等^[71]借助有限元仿真模型,对微切削 AISI 1045 钢加工表面残余应力进行有限元模拟,如图 15^[71]所示。山东大学刘文韬等^[72]通过 DEFORM-3D 建立的有限元仿真模型,得到了干切削、普通冷却和高压冷却条件下距离加工表面不同深度的残余应力分布,仿真结果显示,干切削时加工表面为残余拉应力,随着切削液压强的增大,残余应力由拉应力转变为压应力。兰州理工大学谢黎明等^[73]运用 AdvantEdge 软件采用单一变量法分析了切削 7050 铝合金工件表面残余

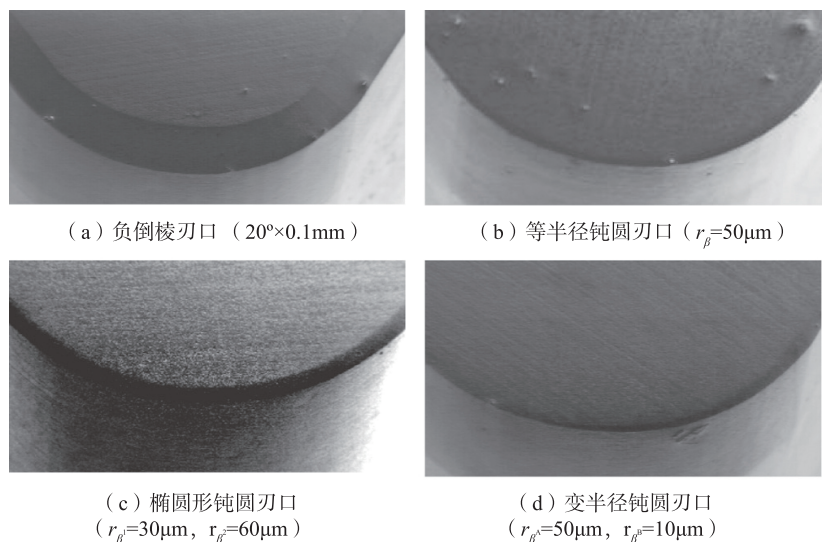


图13 不同几何结构的切削刃

Fig.13 Cutting edge with different micro-geometry

应力的变化规律,仿真结果表明表面为压应力,次表面为拉应力,进给量、切削速度和背吃刀量对加工表面残余应力的影响程度依次减小。基于等效热-力载荷建立的三维有限元模型,北京理工大学唐水源等^[74]将切削过程等效为接触正应力、剪应力和热流量在加工表面的循环作用来模拟预测车削表面残余应力的分布。借助有限元分析,部分学者对切削后

工件表层残余应力分布规律进行了研究,同时也获得了一些结论。然而,残余应力的产生与切削过程中材料的塑性变形和温度场是紧密联系的,由切削开始到结束的整个过程,刀具的磨损直接影响到切削表层的塑性变形程度和温度梯度分布,进而影响到残余应力的分布规律,甚至关系到产生的是拉应力还是压应力。因此,如何模拟刀具磨损过程中残余应力

场的分布,对预测最终零件的疲劳寿命具有重要意义。

6 微观组织演变仿真

加工表面层微观组织结构是表面完整性中非常重要的指标之一,由于微观组织变化,受切削加工引起的物理、力学性能的改变会直接影响成形零件的表面质量、疲劳寿命,最终造成零件的提前疲劳失效。目前,研究人员力图建立切削工艺、切削特征量和微观组织之间的定性或定量关系,以期获得满足宏观性能要求的微观组织结构,从而指导工程应用。同时,如何实现切削过程中微观组织演变可控性,完成制造工艺由“控形制造”到“形性协同制造”的体系升级,实现零件的抗疲劳制造,也是目前该领域的研究重点和热点。

基于相变动力学和位错密度演变模型, Ding 等^[19,75]分别开发了预测切削过程中相变和晶粒尺寸的用户自定义子程序 VUHARD,将其嵌入到有限元切削仿真模型中,对切削 AISI 1045 钢和钛合金切削区域发生的珠光体向奥氏体转变和晶粒细化进行动态仿真和预测,仿真结果如图 16^[19,75]所示。此外,借助基于位错密度构建的材料本构模型, Ding 等^[76]研究了切削速度、刀具前角和切削深度对铜和铝合金切削过程中位错密度增殖和晶粒尺寸的影响,预测晶粒尺寸与实测值具有较好的一致性,如图 17^[76]所示。Wang 等^[77]对 Ti-6Al-4V 高速切削过程中切屑形成阶段和冷却阶段发生的相转变进行了数值仿真,结果表明,切削过程中由 α 相转变成的 β 相在冷却过程中绝大部分重新转变成 α 相和 α'' 相。Li 等^[78]则对 H13 钢切削过程中马氏体向奥氏体的转变进行了有限元模拟。基于 Zener-Hollomon 和 Hall-Petch 方程编写的用户子程序, Rotella 等^[79-80]对切削过程中 Ti-6Al-4V 和 AA7075-T651 加工表面发生的动态结晶晶粒尺寸和硬度

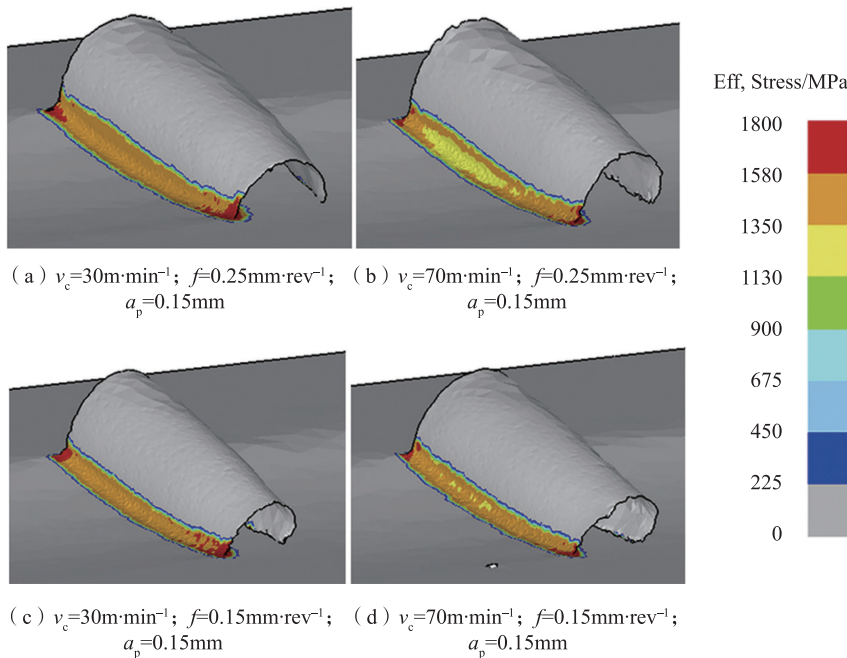


图14 切削过程中的有效应力分布
Fig.14 Effective stress distribution in cutting process

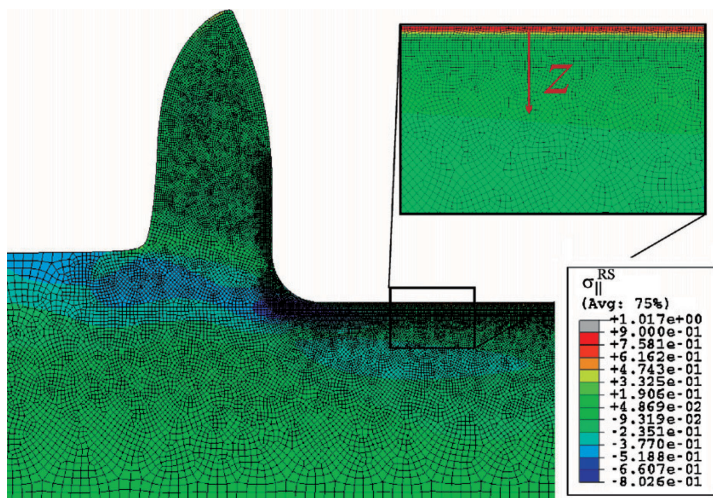


图15 沿切削方向刀刃半径对残余应力深度的影响
Fig.15 Effect of edge radius on depth of residual stress along cutting direction

变化进行了预测。类似的, Jafarian 等^[81-82] 则利用该模型研究了 Inconel 718 合金切削过程中动态再结晶引起的晶粒细化和加工表面层硬度增大, 并输出了加工影响层厚度, 预测结果如图 18^[81] 所示。通过开发的基于 JMAK 动态结晶子程序和建立的三维切削模型, Arisoy 和 Özel^[83-84] 研究了刀具几何、刀具涂层和切削参数对 Ti-6Al-4V 切削表面硬度、动态再结晶体积分数和平均晶粒尺寸的影响。利用粘塑性自洽模型和晶体塑性理论, Li 等^[85] 对钛合金加工表面塑性变形和微织构演化进行了研究, 发现微织构的取向密度随着速度的提高而降低。利用建立的 α 相变厚度回归方程, Umbrello 等^[86] 将

其嵌入有限元模型的用户子程序实现对变形层厚度和显微硬度的变化, 并分析了干切削和深冷加工条件对两者的影响, 仿真结果如图 19^[86] 所示。徐颖强等^[87] 利用有限元软件模拟切削过程, 建立第三变形区温度场, 结合相变临界温度, 对白层厚度进行预测。段春争等^[88] 建立了基于相变机理的白层厚度预测模型, 能够实现 GCr15 淬硬钢切削表面白层厚度进行较为准确的预测。可以看到, 针对切削过程中已加工表面显微组织演变的研究是近几年的热点课题, 并且在显微组织预测方面也取得了不少成果, 对促进形性协同制造的体系升级意义显著。同时, 应该注意到目前研究中存在的尚需解决的问

题, 如没有考虑应力-应变-温度-显微组织之间的耦合作用, 缺少塑性变形(动态再结晶)-相变混合机制模型等。上述分析充分说明, 实现对切削表面显微组织演变的动态模拟和定量预测对有效评价工件表面质量、使用寿命等具有重要意义。

结论与展望

通过总结最近几年有限元仿真技术在金属切削领域的应用, 可以看出切削仿真技术在推动切削技术研究和发面取得了丰富的成果, 主要体现在以下几个方面:

(1) 材料本构模型方面, 在原有本构模型的基础上, 提出的修正本构模型或新本构模型在描述材料流动

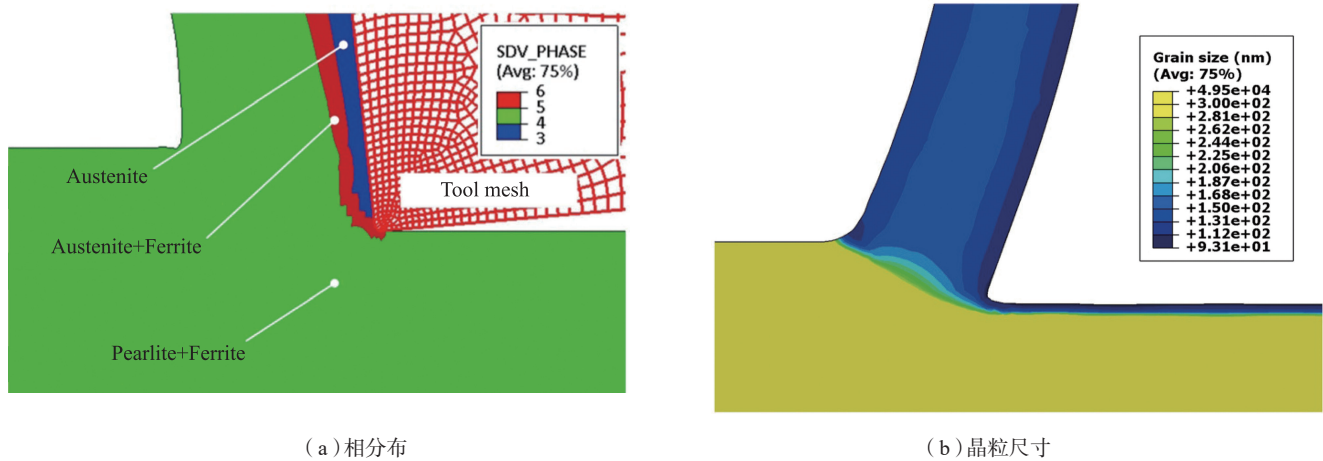


图16 相分布和晶粒尺寸仿真结果
Fig.16 Predicted phase field and grain size distribution

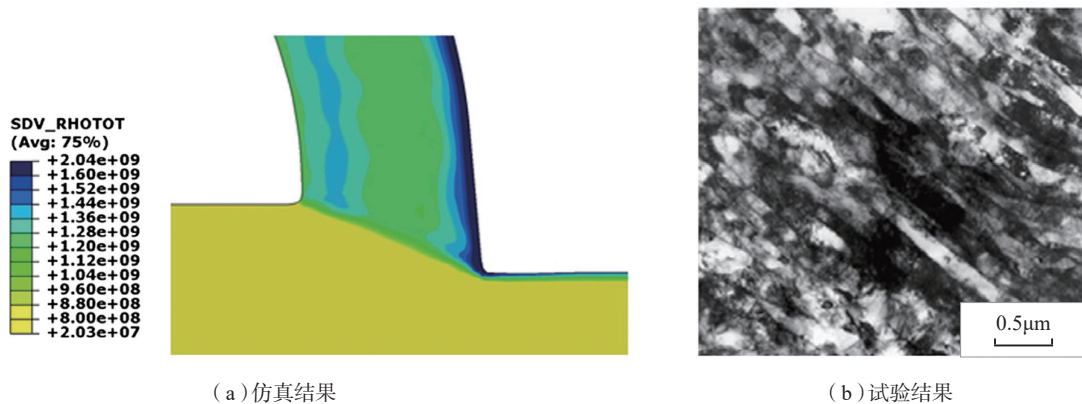


图17 位错密度仿真结果和试验结果对比
Fig.17 Comparison of the predicted dislocation density with experimental result

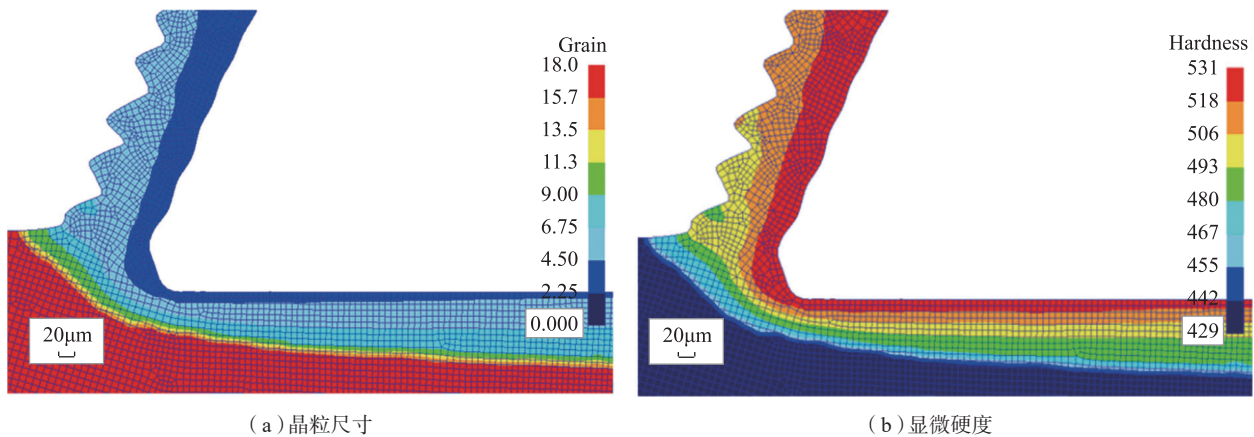


图18 二维切削模型预测晶粒尺寸和显微硬度
Fig.18 Prediction of grain size and microhardness with 2D mode

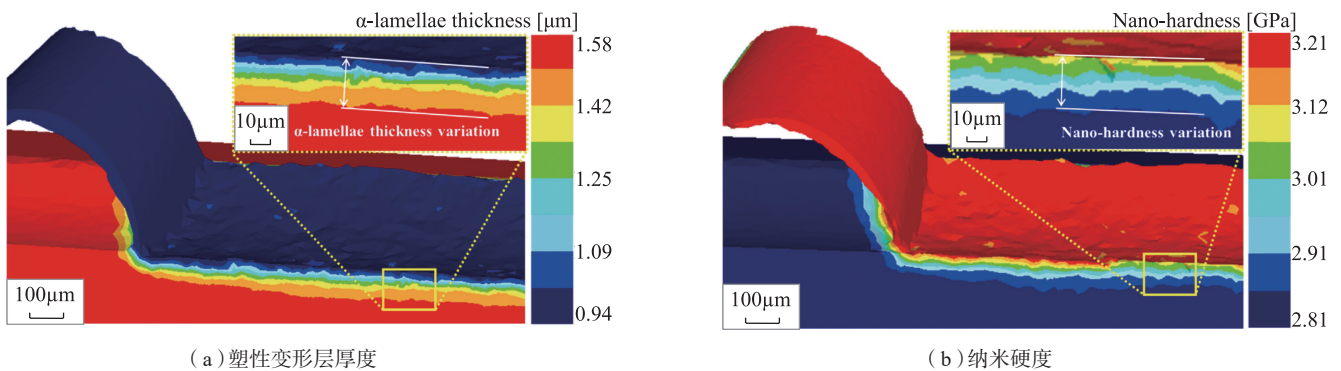


图19 三维切削模型预测塑性变形层厚度和纳米硬度变化
Fig.19 Prediction of plastic deformation depth and nano-hardness variation

应力行为上更为真实,可靠性和准确性得到提高。

(2) 三维仿真模型研究增多,可以充分考虑刀具几何对切削性能和表面完整性的影响,有利于刀具优化和几何参数选择。

(3) 多相/多组分有限元模型的建立,为以后研究多相材料在切削过程中的机械、热和物理学变化提供了基础。

(4) 刀具磨损模型的应用,为研究刀具磨损、优化刀具结构和延长刀具寿命提供了便利。

(5) 借助有限元仿真软件提供的二次开发接口,用户自定义子程序的开发及应用,不仅拓展了仿真软件的应用宽度和深度,而且可以使仿真结果准确性得到提升,更接近真实的切削加工条件。

(6) 材料模型的开发和用户自定义子程序的应用,使得有限元仿真软件可以动态模拟和实时输出切削过程中微观组织演变,符合制造工艺朝“形性协同制造”方向发展的要求。

尽管有限元仿真在切削仿真领域的应用取得了显著的进步,并且体现了巨大的应用潜力。但是,也应该注意到,关于仿真技术在切削加工领域的应用在某些方面仍然存在一定的困难和挑战,值得以后作进一步探索:

(1) 建立更能体现切削加工实际条件的三维仿真模型,将实际的刀具几何(刀刃半径、负倒棱、刀尖圆弧半径等)、冷却润滑条件等加以考虑,研究刀具微观几何结构和切削条件对切削特征量、刀具磨损和表面完整性的影响规律。

(2) 针对铣削和钻削的研究较少,目前大量的研究工作主要围绕车削加工,或将铣削简化为车削进行建模仿真,降低了仿真精度。

(3) 材料本构模型精度较低,模型单一,借助先进的试验条件和数学方法,建立精确度高和适用性好的材料本构模型,是保证有限元仿真结果真实可靠的重要前提。

(4) 借助用户自定义子程序进行二次开发起步较晚,研究成果较少,通过自定义子程序建立更符合切削加工实际条件的如摩擦模型、热分配模型、加载模型、微观组织演变模型、材料本构模型等。

(5) 绝大多数的工程材料是多相组织,而目前针对多相/多组分材料的研究较少,成果也是乏善可陈。

(6) 目前研究大多基于简单的

热-力耦合场,综合考虑热-力-微观组织/化学组分多场耦合的切削仿真模型研究较少。

参考文献

- [1] 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 7th Int. Symposium on Ballistics. The Hague, 1983: 541-547.
- [2] ANDRADE U, MEYERS M, VECCHIO K, et al. Dynamic recrystallization in high-strain, high-strain-rate plastic deformation of copper[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1994, 42(9): 3183-3195.
- [3] 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(3/4): 275-288.
- [4] LI S H, HOU B. Material behavior modeling in machining simulation of 7075-T651 aluminum alloy[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2014, 136(1): 011001.
- [5] ÖZEL T, SIMA M, SRIVASTAVA A K, et al. Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti-6Al-4V alloy with experiments and finite element simulations[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59(1): 77-82.
- [6] UMBRELLO D, RIZZUTI S, OUTEIRO J C, et al. Hardness-based flow stress for numerical simulation of hard machining AISI H13 tool steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 199(1-3): 64-73.
- [7] 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.
- [8] NEMAT-NASSER S, ISAACS J B. Direct measurement of isothermal flow stress of metals at elevated temperatures and high strain rates with application to Ta and Ta-W alloys[J]. *Acta Materialia*, 1997, 45(3): 907-919.
- [9] NEMAT-NASSER S, GUO W G, NESTERENKO V F, et al. Dynamic response of conventional and hot isostatically pressed Ti-6Al-4V alloys: experiments and modeling[J]. *Mechanics of Materials*, 2001, 33(8): 425-439.
- [10] 岳彩旭, 蔡春彬, 黄翠, 等. 切削加工过程有限元仿真研究的最新进展[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(4): 815-825.
- YUE Caixu, CAI Chunbin, HUANG Cui, et al. Recent advances in finite element simulation of machining processes[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(4): 815-825.
- [11] OXLEY P L B. Introducing strain-rate dependent work material properties into the analysis of orthogonal cutting[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1964, 13(2): 127-138.
- [12] OXLEY P L B. *The mechanics of machining: an analytical approach to assessing machinability*[M]. Chichester: Halsted Press, 1989.
- [13] BAMMANN D J, CHIESA M L, JOHNSON G C. Modeling large deformation and failure in manufacturing processes[M]// *Theoretical and Applied Mechanics*. North Holland: Elsevier Science, 1996: 359-376.
- [14] MAEKAWA K, SHIRAKASHI T, USUI E. Flow stress of low carbon steel at high temperature and strain rate (2nd report) [J]. *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, 1978, 44(528): 1495-1500.
- [15] XI Y, BERMINGHAM M, WANG G, et al. Finite element modeling of cutting force and chip formation during thermally assisted machining of Ti6Al4V alloy[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, 135(6): 061014.
- [16] STRENKOWSKI J S, ATHAVALE S. A partially constrained Eulerian orthogonal cutting model for chip control tools[J]. *Journal of Manufacturing Science Engineering*, 1997, 119(4B): 681-688.
- [17] MOVAHHEDY M, GADALA M, ALTINTAS Y. Simulation of the orthogonal metal cutting process using an arbitrary Lagrangian-Eulerian finite-element method[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 103(2): 267-275.
- [18] DING H T, SHEN N G, SHIN Y C. Modeling of grain refinement in aluminum and copper subjected to cutting[J]. *Computational Materials Science*, 2011, 50(10): 3016-3025.
- [19] DING H T, SHIN Y C. A metallo-thermomechanically coupled analysis of orthogonal cutting of AISI 1045 steel[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2012, 134(5): 051014.
- [20] HADDAG B, ATLATI S, NOUARI M, et al. Finite element formulation effect in three-dimensional modeling of a chip formation during machining[J]. *International Journal of Material Forming*, 2010, 3(S1): 527-530.
- [21] 李涛, 顾立志. 金属切削过程有限元仿真关键技术及应考虑若干问题[J]. *工具技术*, 2008, 42(12): 14-18.
- LI Tao, GU Lizhi. Key techniques of finite element simulation in metal cutting process and some considerations[J]. *Tool Engineering*, 2008, 42(12): 14-18.
- [22] 杨勇, 柯映林, 董辉跃. 高速切削有限元模拟技术研究[J]. *航空学报*, 2006, 27(3): 531-535.
- YANG Yong, KE Yinglin, DONG Huiyue. Finite element simulation of high-speed cutting[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006, 27(3): 531-535.
- [23] 吴红兵, 贾志欣, 刘刚, 等. 航空钛合金高速切削有限元建模[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(5): 982-987.
- WU Hongbing, JIA Zhixin, LIU Gang, et al. Finite element modeling of Ti6Al4V alloy high speed cutting[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(5): 982-987.
- [24] USUI E, SHIRAKASHI T. Mechanics of machining from descriptive to predictive theory, on the art of cutting metals[J]. *ASME, Pressure Vessel Directive*, 1982, 7: 13-35.
- [25] COCKROFT M G, LATHAM D J. A simple criterion of fracture for ductile metals[M]. London: National Engineering Laboratory, 1996.
- [26] HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. *Cement and Concrete Research*, 1976, 6(6): 773-781.
- [27] BAO Y B, WIERZBICKI T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46(1): 81-98.

- [28] WILKINS M L, STREIT R D, REAUGH J E. Cumulative-strain-damage model of ductile fracture: simulation and prediction of engineering fracture tests[M]. San Leandro: Lawrence Livermore National Laboratory, 1980.
- [29] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31–48.
- [30] ZOREV N N. Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting[C]// *Proceedings of the International Production Engineering Research Conference*. Pittsburgh, 1963: 42–49.
- [31] 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(3–4): 275–288.
- [32] KOMANDURI R. Some clarifications on the mechanics of chip formation when machining titanium alloys[J]. *Wear*, 1982, 76(1): 15–34.
- [33] CUI X B, GUO J X. Effects of cutting parameters on tool temperatures in intermittent turning with the formation of serrated chip considered[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 110: 1220–1229.
- [34] MABROUKI T, GIRARDIN F, ASAD M, R et al. Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy (A2024–T351)[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(11): 1187–1197.
- [35] JOMAA W, MECHRI O, LÉVESQUE J, et al. Finite element simulation and analysis of serrated chip formation during high-speed machining of AA7075–T651 alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 26: 446–458.
- [36] WANG C Y, DING F, TANG D W, et al. Modeling and simulation of the high-speed milling of hardened steel SKD11 (62 HRC) based on SHPB technology[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 108: 13–26.
- [37] HE Y, ZHANG J, QI Y T, et al. Numerical study of microstructural effects on chip formation in high speed cutting of ductile iron with discrete element method[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 291–301.
- [38] ZHANG Y C, MABROUKI T, NELIAS D, et al. Chip formation in orthogonal cutting considering interface limiting shear stress and damage evolution based on fracture energy approach[J]. *Finite Elements in Analysis & Design*, 2011, 47(7): 850–863.
- [39] ZHANG X P, WU S F, WANG H P, et al. Predicting the effects of cutting parameters and tool geometry on hard turning process using finite element method[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, 133(4): 041010.
- [40] YE G G, JIANG M Q, XUE S F, et al. On the instability of chip flow in high-speed machining[J]. *Mechanics of Materials*, 2018, 116: 104–119.
- [41] 岳彩旭, 刘献礼, 严复钢, 等. 不同刃口形式下锯齿形切屑形成过程的仿真及实验研究[J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(4): 673–678.
- YUE Caixu, LIU Xianli, YAN Fugang, et al. Simulation and experimental study of saw tooth chip formation under different cutting edges preparation[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(4): 673–678.
- [42] 李嫒, 王帅康, 程职玲, 等. 基于 ABAQUS 的镍基高温合金锯齿形切屑演变过程及机理研究[J]. *工具技术*, 2019, 53(1): 36–42.
- LI Man, WANG Shuaikang, CHENG Zhiling, et al. Study on mechanism and evolution of serrated-chip of Ni-base superalloy based on ABAQUS[J]. *Tool Engineering*, 2019, 53(1): 36–42.
- [43] SAEZ-DE-BURUAGA M, SOLER D, ARISTIMUÑO P X, et al. Determining tool/chip temperatures from thermography measurements in metal cutting[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 145: 305–314.
- [44] LIMA H V, CAMPIDELLI A F V, MAIA A A T, et al. Temperature assessment when milling AISI D2 cold work die steel using tool-chip thermocouple, implanted thermocouple and finite element simulation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 143: 532–541.
- [45] AKBAR F, MATIVENGA P T, SHEIKH M A. An experimental and coupled thermo-mechanical finite element study of heat partition effects in machining[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 46(5–8): 491–507.
- [46] COURBON C, MABROUKI T, RECH J, et al. New thermal issues on the modelling of tool-workpiece interaction: application to dry cutting of AISI 1045 steel[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 223: 286–295.
- [47] COURBON C, MABROUKI T, RECH J, et al. Metallurgical aspects of material behaviour in cutting of AISI 1045[J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 554–557: 2085–2092.
- [48] UMBRELLO D, RIZZUTI S, OUTEIRO J C, et al. Hardness-based flow stress for numerical simulation of hard machining AISI H13 tool steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 199(1–3): 64–73.
- [49] 沈雪红, 王哲. Ti6Al4V 钛合金切削力与切削温度场的研究[J]. *工具技术*, 2018, 52(12): 17–20.
- SHEN Xuehong, WANG Zhe. Study on cutting force and cutting temperature field of Ti6Al4V titanium alloy[J]. *Tool Engineering*, 2018, 52(12): 17–20.
- [50] 张京京, 冯平法, 吴志军, 等. 一种借助有限元传热仿真的刀尖点切削温度精确测量方法[J]. *工具技术*, 2010, 44(1): 85–88.
- ZHANG Jingjing, FENG Pingfa, WU Zhijun, et al. Method of precisely measuring tool nose temperature in machining with help of FEM heat transfer analysis[J]. *Tool Engineering*, 2010, 44(1): 85–88.
- [51] ATTANASIO A, UMBRELLIO D. Abrasive and diffusive tool wear FEM simulation[J]. *International Journal of Material Forming*, 2009, 2(S1): 543–546.
- [52] ÖZEL T, THEPSONTHI T, ULUTAN D, et al. Experiments and finite element simulations on micro-milling of Ti–6Al–4V alloy with uncoated and cBN coated micro-tools[J]. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, 2011, 60(1): 85–88.

- [53] LOTFI M, AMINI S, AGHEI M. 3D FEM simulation of tool wear in ultrasonic assisted rotary turning[J]. *Ultrasonics*, 2018, 88: 106–114.
- [54] CALAMAZ M, LIMIDO J, NOUARI M, et al. Toward a better understanding of tool wear effect through a comparison between experiments and SPH numerical modelling of machining hard materials[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2009, 27(3): 595–604.
- [55] BINDER M, KLOCKE F, DOEBBELER B. An advanced numerical approach on tool wear simulation for tool and process design in metal cutting[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2017, 70: 65–82.
- [56] 马廉洁, 谭福慧, 王佳. 车削氧化铝陶瓷刀具磨损有限元仿真研究[J]. *机械制造与自动化*, 2017, 46(5): 93–95.
- MA Lianjie, TAN Fuhui, WANG Jia. Finite element simulation of tool wear in turning alumina ceramic[J]. *Machine Building & Automation*, 2017, 46(5): 93–95.
- [57] 马书娟, 赵明月, 郑耀辉, 等. TC4 钛合金车削刀具磨损数值分析[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(5): 829–833.
- MA Shujuan, ZHAO Mingyue, ZHENG Yaohui, et al. Numerical analysis on tool wear during turning of TC4 titanium alloy[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2018, 37(5): 829–833.
- [58] YUSSEFIAN N Z, KOSHY P. Parametric characterization of the geometry of honed cutting edges[J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(3): 746–752.
- [59] ÖZEL T. Computational modelling of 3D turning: influence of edge micro-geometry on forces, stresses, friction and tool wear in PcBN tooling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(11): 5167–5177.
- [60] FULEMOVA J, JANDA Z. Influence of the cutting edge radius and the cutting edge preparation on tool life and cutting forces at inserts with wiper geometry[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 69: 565–573.
- [61] DENKENA B, KOEHLER J, REHE M. Influence of the honed cutting edge on tool wear and surface integrity in slot milling of 42CrMo4 steel[J]. *Procedia CIRP*, 2012, 1: 190–195.
- [62] BIERMANN D, AMUTH R, HESS S, et al. Simulation based analysis and optimisation of the cutting edge micro shape for machining of nickel-base alloys[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 67: 284–289.
- [63] 刘献礼, 计伟, 范梦超, 等. 基于特征的刀具“形-性-用”一体化设计方法[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(11): 146–153.
- LIU Xianli, JI Wei, FAN Mengchao, et al. Feature based cutting tool “shape-performance-application” integrating design approach[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(11): 146–153.
- [64] 张蓉蓉, 李长虹, 赵先锋, 等. 刀具几何参数对铝合金车削性能的影响[J]. *机械*, 2016, 43(2): 1–4.
- ZHANG Rongrong, LI Changhong, ZHAO Xianfeng, et al. Influence of tool geometrical parameters on turning properties in cutting aluminum alloy[J]. *Machinery*, 2016, 43(2): 1–4.
- [65] ULUTAN D, ALACABE, LAZOGLU I. Analytical modeling of residual stresses in machining[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 183(1): 77–87.
- [66] HUA J, SHIVPURI R, CHENG X M, et al. Effect of feed rate, workpiece hardness and cutting edge on subsurface residual stress in the hard turning of bearing steel using chamfer + hone cutting edge geometry[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 394(1–2): 238–248.
- [67] MARANHÃO C, DAVIM J P. Finite element modelling of machining of AISI 316 steel: numerical simulation and experimental validation[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2010, 18(2): 139–156.
- [68] ARRAZOLA P J, ÖZEL T. Numerical modelling of 3D hard turning using arbitrary Lagrangian Eulerian finite element method[J]. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2008, 3(3): 238–249.
- [69] ÖZEL T, ULUTAN D. Prediction of machining induced residual stresses in turning of titanium and nickel based alloys with experiments and finite element simulations[J]. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, 2012, 61(1): 547–550.
- [70] ARRAZOLA P J, KORTABARRIA A, MADARIAGA A, et al. On the machining induced residual stresses in IN718 nickel-based alloy: experiments and predictions with finite element simulation[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2014, 41: 87–103.
- [71] SCHULZE V, AUTENRIETH H, DEUCHERT M, et al. Investigation of surface near residual stress states after micro-cutting by finite element simulation[J]. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, 2010, 59(1): 117–120.
- [72] 刘文韬, 刘战强. 钛合金 Ti-6Al-4V 高压冷却车削过程有限元分析[J]. *现代制造工程*, 2018(10): 44–50.
- LIU Wentao, LIU Zhanqiang. Finite element analysis of turning Ti-6Al-4V under high-pressure coolant[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2018(10): 44–50.
- [73] 谢黎明, 董情焱, 靳岚. 7050 铝合金切削参数对表面残余应力影响的仿真分析[J]. *机械设计与制造工程*, 2018, 47(10): 17–20.
- XIE Liming, DONG Qingyan, JIN Lan. Simulation analysis of the influence of cutting parameters of 7050 aluminum alloy on surface residual stress[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2018, 47(10): 17–20.
- [74] 唐水源, 焦思程, 卢继平, 等. 基于等效热-力载荷的 20Cr2Ni4 预应力车削残余应力模拟及实验[J]. *北京理工大学学报*, 2018, 38(7): 661–667.
- TANG Shuiyuan, JIAO Sicheng, LU Jiping, et al. Simulation and experimental research on residual stress in pre-stress turning of 20Cr2Ni4 based on equivalent loading theory[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(7): 661–667.
- [75] DING H T, SHIN Y C. Dislocation density-based grain refinement modeling of orthogonal cutting of titanium[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, 136(4): 041003.
- [76] DING H T, SHEN N G, SHIN Y C. Modeling of grain refinement in aluminum and copper subjected to cutting[J]. *Computational Materials Science*, 2011, 50(10): 3016–3025.
- [77] WANG Q Q, LIU Z Q, YANG D, et al. Metallurgical-based prediction of stress-temperature induced rapid heating and cooling

phase transformations for high speed machining Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials & Design*, 2017, 119: 208-218.

[78] LI B X, ZHANG S, ZHANG Q, et al. Modelling of phase transformations induced by thermo-mechanical loads considering stress-strain effects in hard milling of AISI H13 steel[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 149: 241-253.

[79] ROTELLA G, UMBRELLO D. Finite element modeling of microstructural changes in dry and cryogenic cutting of Ti6Al4V alloy[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2014, 63(1): 69-72.

[80] ROTELLA G, DILLON O W, UMBRELLO D, et al. Finite element modeling of microstructural changes in turning of AA7075-T651 alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2013, 15(1): 87-95.

[81] JAFARIAN F, IMAZ CIARAN M, UMBRELLO D, et al. Finite element simulation of machining Inconel 718 alloy including microstructure changes[J]. *International Journal*

of Mechanical Sciences, 2014, 88: 110-121.

[82] JAFARIAN F, UMBRELLO D, JABBARIPOUR B. Identification of new material model for machining simulation of Inconel 718 alloy and the effect of tool edge geometry on microstructure changes[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2016, 66: 273-284.

[83] ARISOY Y M, ÖZEL T. Prediction of machining induced microstructure in Ti-6Al-4V alloy using 3-D FE-based simulations: effects of tool micro-geometry, coating and cutting conditions[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 220: 1-26.

[84] ÖZEL T, ARISOY Y M. Experimental and numerical investigations on machining induced surface integrity in Inconel-100 nickel-base alloy[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 13: 302-307.

[85] LI A H, PANG J M, ZHAO J, et al. FEM-simulation of machining induced surface plastic deformation and microstructural texture evolution of Ti-6Al-4V alloy[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 123:

214-223.

[86] UMBRELLO D, BORDIN A, IMBROGNO S, et al. 3D finite element modelling of surface modification in dry and cryogenic machining of EBM Ti6Al4V alloy[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science & Technology*, 2016, 18: 92-100.

[87] 徐颖强, 李娜娜, 李万钟, 等. 硬态切削工件表面白层厚度预测方法[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(3): 182-189.

XU Yingqiang, LI Nana, LI Wanzhong, et al. Prediction method of the white layer thickness in hard cutting[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(3): 182-189.

[88] 段春争, 张方圆, 孔维森. 干硬切削表面白层厚度的建模与预测[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(17): 194-202.

DUAN Chunzheng, ZHANG Fangyuan, KONG Weisen. Modeling and prediction of white layer thickness in dry and hard machining of hardened steel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(17): 194-202.

通讯作者: 张松, E-mail: zhangsong@sdu.edu.cn。

Research Development of Application of Finite Element Method on Cutting Process

ZHANG Song^{1,2}, LI Binxun^{1,2}, LI Quhao^{1,2}, MAN Jia^{1,2}

(1. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Key National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

[ABSTRACT] Benefited from the recent development of the high-performance computer and software for finite element analysis, numerical modelling has become one of the efficient tools to help understand cutting mechanism, study tool wear and improve surface quality during machining process. Commonly used material constitutive models are summarized, and analyze several key factors encountered when establishing the cutting simulation model. A systemic introduction of the recent research development involved in chip formation, cutting temperature, cutting forces, tool wear, tool design and residual stress prediction as well as microstructure evolution simulation was addressed. Finally, toward the existing challenges in cutting simulation modeling, the future scope and hot issues needing further study in this field were outlined.

Keywords: Finite element model; Chip formation, Cutting force and cutting temperature; Residual stress; Surface quality
(责任编辑 李丹)