

7-2-2020

Recent Advances in Finite Element Simulation of Machining Processes

Caixu Yu

Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

Chunbin Cai

Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

Huang Cui

Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

Erliang Liu

Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Recent Advances in Finite Element Simulation of Machining Processes

Abstract

Abstract: Recently, the finite element simulation technology has been widely applied in machining simulation and has played an irreplaceable role in the investigations of machining mechanism of metal and composite materials, optimization of cutting parameters, etc. The importance of finite element simulation, commonly used software and material constitutive model were introduced. *The latest research progress of the finite element simulation of cutting at home and abroad was summarized, including the simulation of chip morphology, the simulation of cutting force and cutting temperature, tool wear simulation, the machined surface integrity, simulation of the effect of multi-steps cutting on cutting process and finite element simulation of cutting process of composites. A preliminary forecast on the future development direction of finite element simulation was made.*

Keywords

finite element simulation, constitutive model, cutting force and cutting temperature, tool wear, surface integrity

Recommended Citation

Yu Caixu, Cai Chunbin, Huang Cui, Liu Erliang. Recent Advances in Finite Element Simulation of Machining Processes[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(4): 815-825.

切削加工过程有限元仿真研究的最新进展

岳彩旭, 蔡春彬, 黄翠, 刘二亮

(哈尔滨理工大学, 哈尔滨 150080)

摘要: 近年来, 有限元仿真技术在切削加工模拟中应用越来越广泛, 在研究金属和复合材料等加工机理, 优化切削加工参数等方面发挥了不可替代的作用。介绍了有限元仿真的重要性及其常用软件和材料的本构模型; 总结了国内外切削有限元仿真的最新研究进展, 主要包括以下内容: 切屑形态, 切削力及切削温度, 刀具磨损, 已加工表面完整性, 多步切削对切削过程影响及复合材料切削过程的有限元仿真; 总结了切削过程有限元仿真, 并对其发展作了初步的展望。

关键词: 有限元仿真; 本构模型; 切削力及切削温度; 刀具磨损; 表面完整性

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 04-0815-12

Recent Advances in Finite Element Simulation of Machining Processes

Yu Caixu, Cai Chunbin, Huang Cui, Liu Erliang

(Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Recently, the finite element simulation technology has been widely applied in machining simulation and has played an irreplaceable role in the investigations of machining mechanism of metal and composite materials, optimization of cutting parameters, etc. The importance of finite element simulation, commonly used software and material constitutive model were introduced. *The latest research progress of the finite element simulation of cutting at home and abroad was summarized, including the simulation of chip morphology, the simulation of cutting force and cutting temperature, tool wear simulation, the machined surface integrity, simulation of the effect of multi-steps cutting on cutting process and finite element simulation of cutting process of composites. A preliminary forecast on the future development direction of finite element simulation was made.*

Keywords: finite element simulation; constitutive model; cutting force and cutting temperature; tool wear; surface integrity

引言

传统的加工工艺在加工制造业中仍持续占据主导地位, 并且工艺改进很大程度上依赖实验。先进机床和刀具技术的设计与新型材料的加工旨在提高机械效率, 产品质量和降低成本。计算机技术高

速发展的环境下, 仿真技术的应用为上述目的的实现提供了有力工具。对于零件的加工过程来说, 工艺优化需要考虑最佳切削条件、冷却剂类型、切削刀具等因素。仿真模型需要同实际加工工艺相结合, 而高精度的仿真模型正是适应工艺优化需求而发展起来的^[1]。通过高精度的仿真模型可以准确获得切削过程中基本的物理变量, 如切削应力、应变、应变率、温度等。另一方面, 还可以为加工性能进一步预测提供基础数据, 如刀具磨损、表面完整性、工艺稳定性等。由于仿真技术已成为研究切削过程



收稿日期: 2014-11-30 修回日期: 2015-07-04;
基金项目: 黑龙江省自然科学基金(E201307);
作者简介: 岳彩旭(1982-), 男, 山东阳谷, 博士, 副教授, 研究方向高强度钢高速切削机理研究和切削过程仿真; 蔡春彬(1989-), 男, 山东临沂, 硕士生, 研究方向难加工材料切削过程仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 815 •

的有力工具，国际生产工程学会(CIRP)成立了“Modeling of Machining Operation”工作组，进而推动仿真技术在切削机理方面的研究和工业界的应用。本文主要对近几年来有限元仿真技术的发展进行了总结，并对切削过程的仿真技术未来发展做出初步预测。

1 简介

1.1 仿真模型的建立

仿真模型可以被集成到工艺规划中来提高产品质量和生产效率，也可以被有效地应用于生产工程的控制中，进而减少或消除反复试验的次数。在实际工艺过程中非常注重工艺性能的预测，如刀具寿命、表面光洁度、表面完整性、切屑的形成与破

坏、毛刺的形成、局部精度等^[2]。图 1 总结了切削过程仿真模型建立所涉及的各方面的因素。为模型定量的输入各种不同的参数，那么仿真模型会输出工艺过程所关注的各种物理参数，如切削力、切削温度和表面残余应力等，若对模型进行二次开发，那么模型还会输出刀具寿命、表面完整性等结果。

1.2 常用有限元仿真软件

计算机技术的普及和运算速度的不断提高，使得有限元分析在工程设计和分析中的应用越来越广泛。目前常用的 CAE 仿真软件主要有 ABAQUS, MARC, ANSYS, DYNA, Deform 等主流软件，表 1 为部分软件比较。

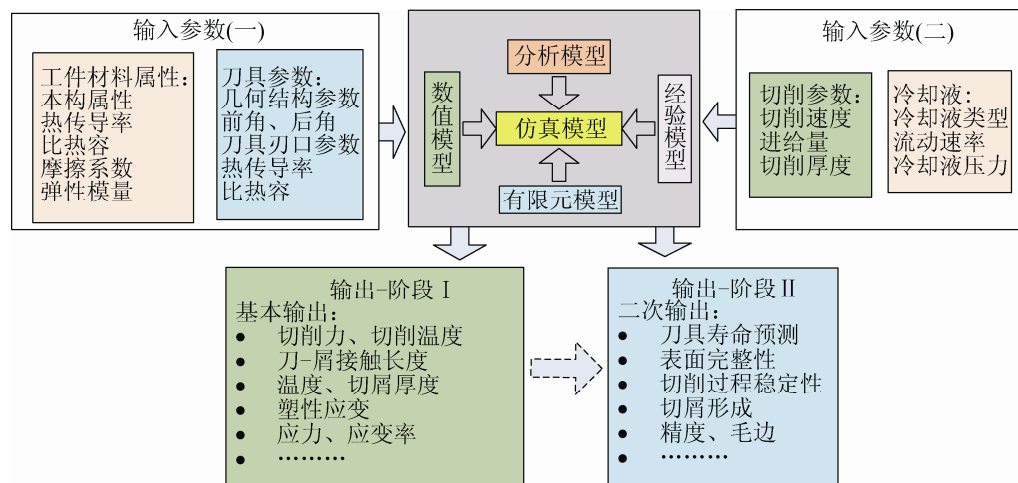


图 1 切削过程仿真的涉及因素及结果输出

表 1 常用的切削过程仿真软件比较[3]

| 软件名称 | 主要算法 | 特点 | CAE 模块 | 适用领域 |
|--------|-----------------------------------|--|---------------------------------|---------------------|
| ABAQUS | 以 Lagrange 算法为主，兼有 ALE 和 Euler 算法 | 精于非线性问题的求解，可分析复杂的固体力学和结构力学系统；可模拟任意几何形状零件的力学和多物理场分析 | Standard, Explicit, CAE, Design | 广泛应用于机械加工、冶金、土木材料加工 |
| MARC | Lagrange 算法 | 可处理各种线性、非线性结构分析、模态分析、动力响应分析、静动接触分析、小破坏分析等 | Mentat, Parallet, Hexmesh | 核电、国防、航天、汽车、造船等 |
| DYNA | 以 Lagrange 算法为主，兼有 ALE 和 Euler 算法 | 可求解非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等，可分析接触非线性、冲击载荷非线性和材料非线性问题 | 基本分析、动力分析、非线性分析、热传导 | 汽车安全设计、武器系统设计、金属成型 |
| DEFORM | Newton-Raphson 与 Explicit 算法 | 能够进行环境内综合建模、成型、热传导和成型设备特征模拟分析仿真，适用于热冷温成型 | 数据分析输入、网格划分和再划分、数据传递计算 | 锻造、轧制、挤压、冷锻、拉伸、压塑等 |

2 材料本构模型

2.1 材料本构模型研究

在实际的机械加工中工件材料的应力并不是一成不变的,而是随着温度、应变、应变率等一系列变量的变化而变化。各个变量与材料的流动应力之间复杂的关系是当今国内外研究人员研究的难点,也是关系仿真精度的一个关键点。目前国际上已经有一些成熟且应用较多的材料本构模型,例如 D.Umbrello 模型、Y.B.Guo 模型、Y.Altintas 模型、Johnson-Cook 模型,但这些模型还不尽完善,也就是说这些模型在真正应用中距离机械加工的真实情况还存在一定的差距,研究人员正对本构模型中的参数进行细化使其更加完善。本构模型是有限元建模的首要步骤,由于有限元仿真的目的是实现对真实加工情况的预测从而降低加工成本、减少加工时间、提高加工效率,因此本构模型的建立在机械加工中起着不可或缺的作用^[3]。

2.2 几种常见材料本构模型

1. 幂律模型: 此模型假设一种幂律关系,即把流动应力作为应变、应变率和温度的函数(式(1))。实验测定的指数 n , m , τ 分别表示应变、应变率、温度敏感性。

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_0} \right) \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right)^m \quad (1)$$

2. Oxley 本构模型: Oxley^[4-5]证明流动应力可以通过加工硬化行为来表达,见公式(2)。速度-修正温度是 σ_0 和 n 的函数,将应变率和温度结合到一个函数关系式中,见公式(3)。

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 \bar{\varepsilon}^n \quad (2)$$

$$T_{\text{MOD}} = T \left[1 - v \log \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \right] \quad (3)$$

式中: σ_0 是强度系数; n 是加工硬化指数; T 是温度; v 是常数, $\bar{\varepsilon}$ 是应变; $\dot{\bar{\varepsilon}}$ 是应变率。此模型被广泛应用于中低碳钢的滑移线建模中^[5]。

3. Johnson-Cook 本构模型: Johnson-Cook 模

型广泛为大众所接受,并大量应用于建模与仿真研究中^[6],见公式(4)。流动应力是应变、应变率和温度的函数。

$$\bar{\sigma} = \left[A + B(\bar{\varepsilon})^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (4)$$

式中: A 为材料在准静态下的屈服强度, $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ 为等效塑性应变常数, T_0 为室温, T_m 为材料熔点, B 、 C 、 n 、 m 是模型参数,其中 B 为应变硬化系数, C 为应变率敏感系数, n 为应变硬化指数, m 为应变率灵敏指数。Johnson-Cook 模型忽略了真实材料在实验过程的应变、应变率和温度耦合。因此,Calamaz 等人^[7-9]提出应该对此模型进一步完善,于是 Sima 和 Özel 在方程中加入了新的应变和温度来修正公式,见公式(5):

$$\bar{\sigma} = \left[A + B(\bar{\varepsilon})^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \left[D + (1 - D) \left[\tan \tan h \left(\frac{1}{(\bar{\varepsilon} + p)^r} \right) \right]^s \right] \quad (5)$$

模型中,参数 D 和 P 的取决于工件温度,见公式(6):

$$D = 1 - \left(\frac{T}{T_m} \right)^d, p = \left(\frac{T}{T_m} \right)^b \quad (6)$$

Guo 和 Liu^[10]在结合高温与速度修正公式后进行了拉伸试验,以此来估计 AISI 52100 淬火钢的材料性能。采用压缩和切削实验相结合的方法来修正模型,同时也再次确认压缩测试更适合对金属切削加工中材料性能的仿真^[11]。随后,Guo 等^[12]利用 ISV 模型对 AISI 52100 钢和 Ti6Al4V 合金的切屑形成进行有限元建模。他们预测了连续型、锯齿型和不连续切屑的形成、温度分布等切削变量。一些研究人员专注于用新型材料模型来解释 Ti6Al4V 材料在加工过程中锯齿形切屑的形成^[13]。

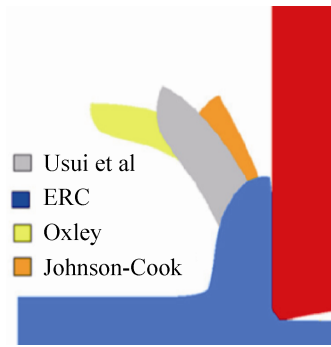
2.3 本构方程系数的确定

本构参数一般是通过材料样本在高速实验设备下试验得到的,例如泰勒冲击实验、霍普金森拉

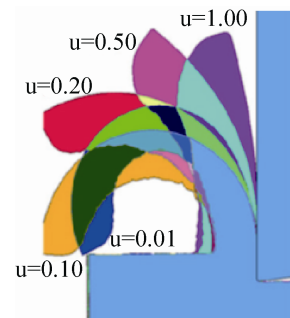
伸和剪切实验。这些实验设备能够提供近似于切削时的工作条件，但它们并不适用于所有情况，使用特殊样本对提高材料的试验条件是一种可行的方法，样本的剪切应变接近于 4，应变率达 $2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ，温度接近于 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ，但是这些参数距离真实的加工情况还是有很大差距。Burns 等^[14]开发了在高速加热状态下的分离式霍普金森压杆(SHPB)实验，同时发现加热速率会影响到试验结果。其他参数如摩擦系数、热分配系数等的确定仍然是非常有难度的，研究人员一直在努力完善试验方法来确定本构关系系数。

Chandrasekaran 等人^[15]采用分离式霍普金森压杆实验来确定初始材料的本构关系。随后，在切屑形成过程中，材料流动应力便可以通过正交切削试验结果的解析模型来进行计算。Shi 等人^[16-17]开发了一种新型的方法来克服 SHPB 试验的局限性。这种方法结合了有限元仿真、塑性理论、传热以及金属正交切削机理等理论，从而获得主剪切区的温度、应变和应力分布特性。

Shatla 等^[18]利用 Oxley 理论^[19]来模拟正交切削过程，他们通过反演分析和论证 Johnson-Cook 材料模型在众多材料中的应用从而对其进行改进。Özel 和 Zeren^[20]也利用 Oxley 分析来计算高应变速率下的流动应力。结合 SHPB 正交切削试验中得到的实验数据可以看出 Johnson-Cook 材料模型可以应用于 AISI 1045 钢、AL6082-T6 铝合金、Ti6Al4V 钛合金的切削过程。最近，Shrot 和 Bake^[21]利用切屑形态和切削力的实验数据，通过 Levenberg-Marquardt 算法确定了 Johnson-Cook 高速切削加工的本构模型参数。Leopold^[22]等强调了摩擦系数在正交切削中对切屑形成的影响，如图 2(a)所示。以 AISI 1045 钢为例，Rizzuti^[23]认为仿真时采用不同的材料本构模型对切屑的形态会有影响，如图 2(b)所示。可以看出，对切屑仿真进行深入细致的研究是切削加工仿真技术领域的一项重要工作，它对虚拟加工中切削参数的优化有着预测和分析的作用，是完善加工仿真中物理仿真的重要途径。



(a) 不同的材料模型对切屑形态的影响



(b) 不同摩擦系数对切屑形态的影响

图 2 本构参数对有限元仿真结果的影响^[23]

3 切削过程的有限元仿真研究

3.1 切屑形态的仿真

金属切削加工过程是一种材料去除的不可逆过程，并伴随着大应变和高温状态下的大塑性变形的断裂。随着金属切削加工不断向高精度、高效率 and 自动化方向发展，切屑控制问题越来越成为切削加工中的重要课题^[24]。切屑的形成、流向及断裂研究主要包括分析、数值计算、实验研究 3 个部分。金属切削过程的研究重点和核心与切屑的形成过程紧密联系在一起，一般可将切屑分成 4 种类型。盆洪民等^[25]采用 MSC.Marc 软件中网格重新划分技术模拟了硬态切削过程连续切屑形成，模型中考虑工件材料机械物理性能随时间的变化和流动应力受应变、应变速率和温度影响特性，模型的仿真精度较高。Davies 和 Burns^[26]开发了一个分析非线性动力学方法来预测切屑从连续过渡到局部剪切的过程。Molinarietal 等^[27]分析了加工 Ti6Al4V 钛合金时切削速度对切削力的影响，他们提出了一种模型来确定剪切带宽度和生成频率。

最近 Pawade 等^[28]通过建立有限元分析来揭示 Inconel718 切削过程中绝热剪切机制, 并得到了切削条件对锯齿状切屑生成的影响。Guo 和 Dornfeld^[29]及 Guo 和 Liu^[30]分别研究了钻削和车削的稳态切削过程状态。图 3 展示了 AA 7075 钛合金在高速铣削过程中切屑生成的图像以及连续形切屑生成过程的仿真结果^[31]。在切削速度 v 为 180 m/min, 和进给量 f 为 0.1 mm 的条件下加工 Ti6Al4V 钛合金, 锯齿状切屑的仿真结果及扫描电镜测试结果^[32]。Calamaz 等^[33]利用 LS-DYNA 软件, 使用 SPH 方法, 获得了正交切削 Ti6Al4V 钛合金的锯齿形切屑, 并与实验结果进行了对比。同时, 使用商业有限元程序修改了材料模型, 运用弹性分析模型仿真了 Ti6Al4V 钛合金的局部剪切切屑的形成。如图 4 所示。

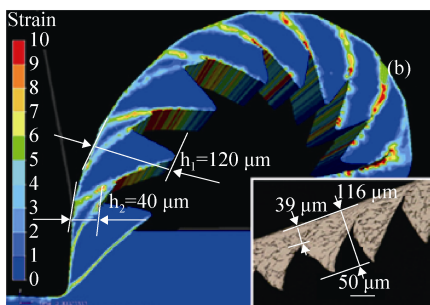


图 3 连续形切屑生成过程的模拟^[31]

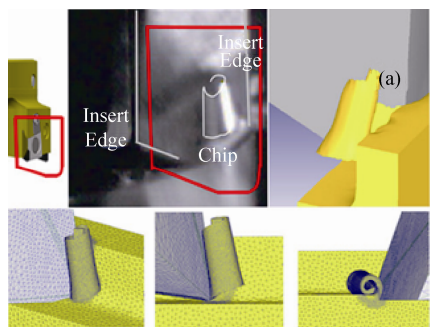


图 4 锯齿状切屑生成过程的模拟^[33]

3.2 切削力及切削温度的仿真研究

IbrahimA 于 2007 年在博士论文中采用有限元仿真的方法系统地研究了硬态切削淬硬钢过程中切削力的特性, 并分析了刀具刃口形式对切削力的影响以及切削条件对已加工表面残余应力的作用。

Oxley 在滑移线理论基础上引入加工硬化, 提出了平行四边形切削模型, 并针对斜角切削开发了一系列算法和模型, 实现了对切削力的预测^[34]。Tugrul Özel 在使用有限元方法模拟预测硬态切削力方面做了一定的工作, 如图 5 所示^[35]。国内外诸多学者也对硬态切削温度进行了有限元仿真, 如 L.Filice 对切削过程的热现象进行了仿真, 在仿真结果的基础上对切削工艺的优化提供了借鉴意义^[36]。Y.B.Guo 和 C.R.Liu 运用 Zener-Hollorn 方程建立了硬态切削淬硬钢 AISI 52100 的有限元切削模型, 得到的切削力和切削热有限元模拟结果与实验结果具有较好的一致性^[37]。哈尔滨理工大学岳彩旭采用 abaqus 软件对不同刃口的 PCBN 刀具硬态切削淬硬钢过程进行了仿真, 得到了刃口形状对切削过程的影响结果, 图 6 为锋利刀具的切削温度仿真结果^[38]。英国伯明翰大学 E.G.Ng 博士对硬态切削过程中的切削温度和切削力进行了有限仿真求解, 研究结果为切削条件的优化提供了有力的支撑工具^[39]。

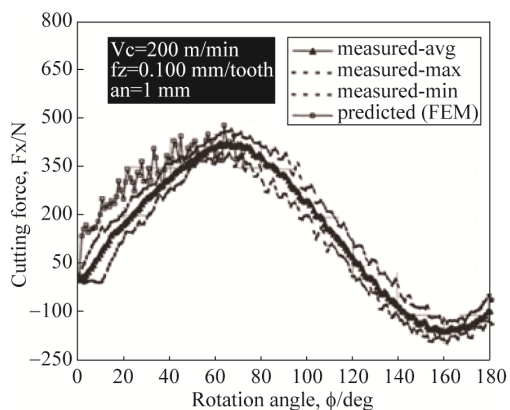


图 5 切削力的仿真结果

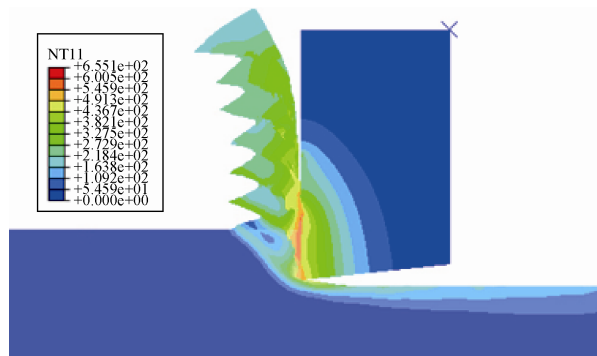


图 6 切削温度的仿真结果

3.3 刀具磨损的仿真研究

刀具磨损能够显著地影响工件的加工质量。因此,刀具磨损预测和刀具置换准则对于减少机械加工成本和提高优化性能十分重要。Xie 等以 Python 语言为基础编写了刀具磨损仿真程序,该程序可以根据磨损率模型来计算刀具磨损,然后在切削过程中更新刀具磨损后的刀具几何形状和刀具磨损过程^[40]。现如今,计算机硬件和软件的能力及效率的大幅提升使得 3D 模型仿真在机械加工中表现出了卓越的成效。3D 有限元分析装备有 3D 更新程序,目的在于对刀具的磨损动态进行预测,如图 7 所示。数值模拟中与实验获得的最大侧面磨损 VB 和凹坑深度与位置(KT 与 KM)较为一致。但是,对前刀面区域的预测却有较大的出入。随后,Attanasio 和 Umbrello 通过考虑磨料磨损改进了他们提议的磨损模型,这使得前刀面磨损模拟取得了较好的效果^[41-42]。Özel 等研究了多涂层刀具对加工 Ti6Al4V 的影响,通过刀具磨损仿真结果的研究为刀具涂层的优化提供了理论依据^[43]。与此同时,Attanasio 等观察了未涂层刀具在加工低碳钢过程中前刀面区域的演变过程^[44]。

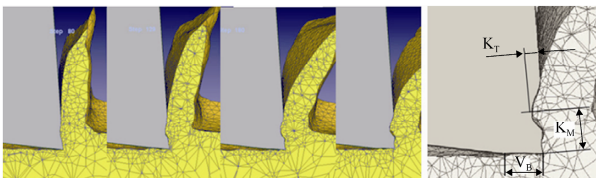


图 7 刀具前刀面磨损演化的动态预测及测量

3.4 已加工表面完整性的仿真研究

金属加工的最终目的是在合理的加工成本下使得加工表面完整性最优,因为表面完整性直接关系到加工部件的使用性能与寿命。目前学术界针对表面完整性主要集中在表面粗糙度、表面残余应力分布特性、表面变质层变化情况等。为了获得较好的表面完整性^[45]。诸多学者采用有限元仿真模型结果来预测已加工部件的残余应力,Barash 和 Schoech^[46]在他们早期的研究中,通过一个简单的

滑移线模型来预测工件分型面的残余应力。Wu 和 Matsumoto^[47]用一个分析模型来研究工件硬度对工件表面所产生的残余应力的影响。Liang 和 Su^[48]针对正交切削过程开发了一个预测模型,此模型主要针对已加工表面质量展开定量研究。随后,Liang 等^[49]开发了一个基于物理的模型来量化评估切削条件和刀具几何参数对已加工表面残余应力的影响,研究结果对切削条件的优化提供理论依据。Ulutan 等^[50]研发了一个综合分析模型来预测加工过程中产生表面变质层,使得仿真模型成为控制变质层生成的有效手段。Lazoglu 等^[51]随后提出了一个增强的分析模型,这种模型是通过使工件上的热应力和机械应力叠加得到的,通过分析模型在短时间内便可以准确获得进给方向残余应力分布特性图,研究结果如图 8 所示。Chen 等^[52]研究了 Ti6Al4V 钛合金加工过程中刀具磨损对残余应力的影响,如图 9 所示。

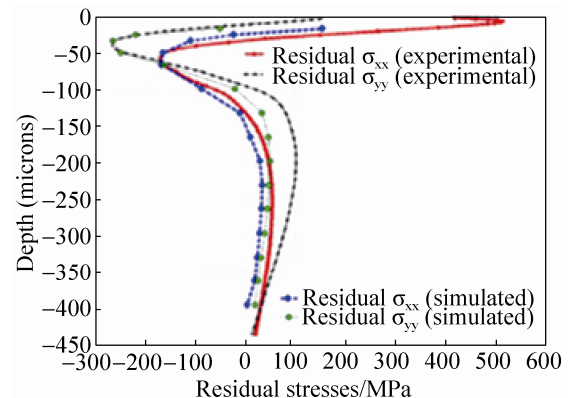


图 8 仿真和实验残余应力比较^[51]

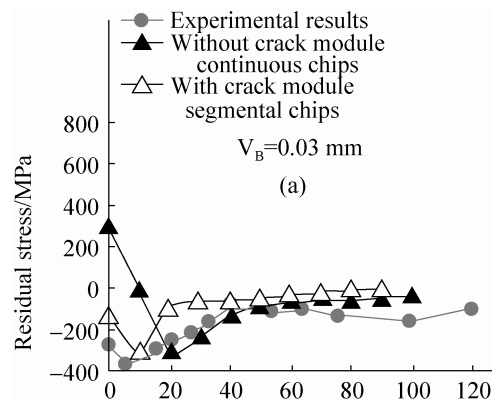


图 9 切屑形成和后刀面磨损长度对残余引起的影响^[52]

为了提高速度和精确度, 研究人员开发了联合模型。联合模型是基于解析—有限元模型的相互作用建立的, 目的在于精确的预测机械加工过程中的残余应力, 从而减少计算费用的支出。Valiorgue 等^[53]和 Mondelin^[54]等用联合方法论来处理 3D 加工问题, 结果表明为了获得稳定/平稳的残余应力, 至少需要 5 组转数, 其研究结果如图 10 所示。

3.5 多步切削对切削过程影响的仿真研究

H. Dehmani 等^[55]用二维的平面应变热机械有限元模型来模拟多步切屑的形成, 并研究材料去除

所产生的残余应力。利用有限元软件 ABAQUS 的显隐式方法来分析加工过程中影响残余应力生成的物理现象。随后研究多步切削所产生的累积应变和温度对残余应力的影响, 如图 11 所示。同时, H. Dehmani 等还通过建立热机械有限元仿真模型来预测由加工操作所产生的残余应力。研究的特殊性在于模拟多步累积的压力和温度对残余应力剖面的影响。该方法其试验结果接近于实际, 切削深度是影响残余应力的主要因素。

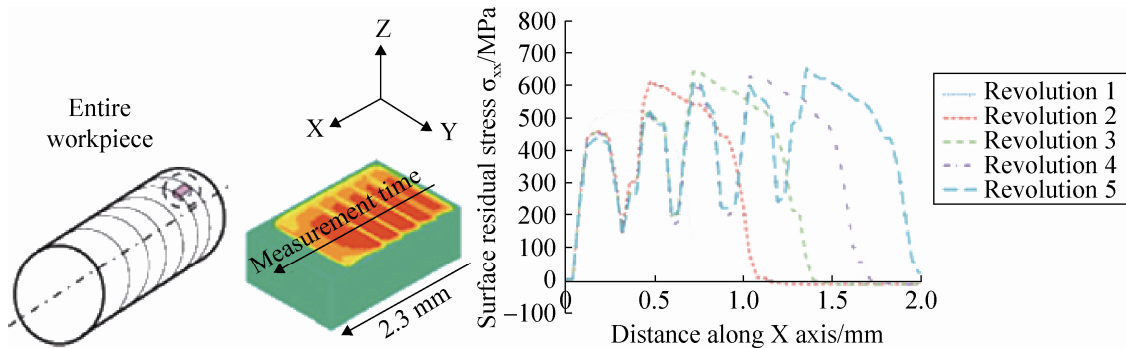
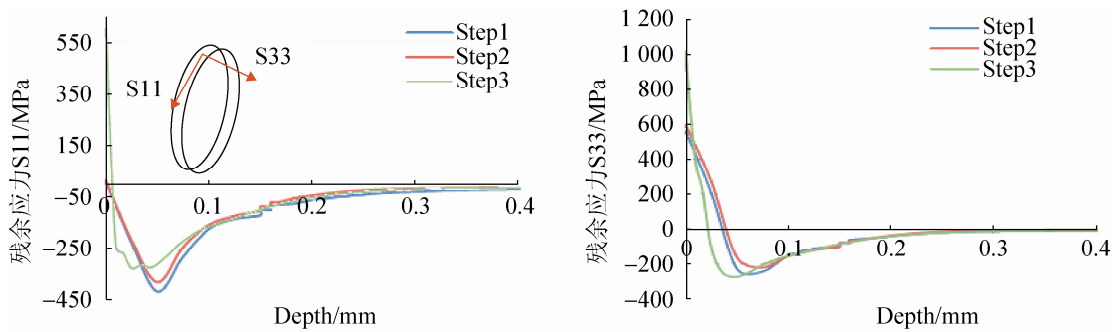
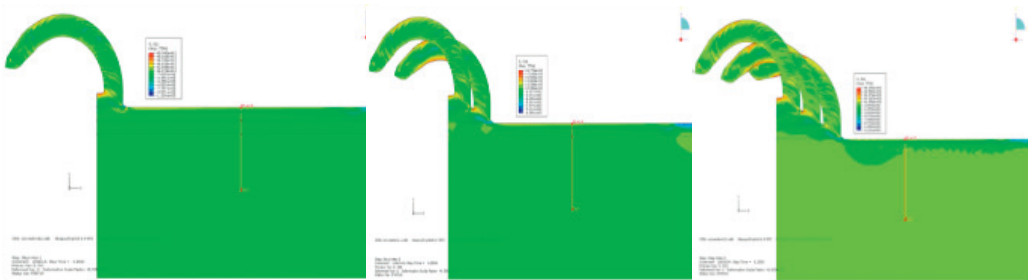


图 10 混合模型表面沿测量线残余应力的演化^[54]



(a) 三次切削之后残余应力



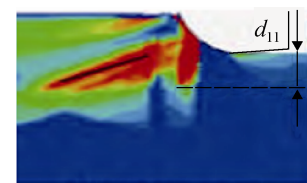
(b) 残余应力测定仿真结果

图 11 多步切削对切削过程影响的仿真结果^[55]

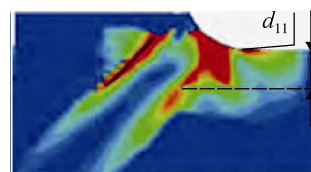
4 复合材料切削过程有限元仿真研究

复合材料切削是大应变、高应变率的脆性加工过程。切削过程中刀-屑之间的接触及边界条件都呈现出强烈的非线性特征。因此，可通过 ABAQUS/Explicit 模块建立复合材料切削有限元仿真模型，模拟其切削加工过程。仿真模型中单元应采用四节点减缩应力单元和自动沙漏控制，且在仿真建模过程中不考虑温度的影响。由于所建立的复合材料切削模型为宏观模型，故不考虑纤维与基体的结合问题。全燕鸣和叶邦彦^[56]对复合材料切削加工表面结构与表面粗糙度进行了试验研究，发现纤维增强复合材料切削表面质量与切削方向密切相关。Arola 和 Ramulu^[57]把单向复合材料的切削简化为基于有限元理论的正交切削模型，对切削力的仿真值与实验值进行了比较，结果表明，仿真结果与实验结果吻合较好。Ramesh^[58]等对 4 种不同纤维方向的复合材料进行了研究分析，获得了不同纤维方向复合材料的损伤与载荷之间的关系。Mahdi 和 Zhang^[59]分别建立了复合材料切削二维、三维有限元模型，将其等效为各向同性的金属材料，分析了切削力与纤维方向之间的关系。Iliescu 等^[60]分析了纤维方向对亚表面损伤深度及切削力的影响，研究表明，随着纤维方向的增加，工件亚表面的损伤深度随之增加，刀具的前角对切削力的大小及亚表面的损伤深度影响较小。Wern 和 Ramulu^[61]研究了 GFRP 切削纤维方向对切削力及纤维拉出的影响，并得出当刀具为正前角时工件破坏区域较小且切削力也较小的结论。Mkaddem 等^[62]建立了基于准静态的复合材料切削模型，研究了纤维方向对复合材料切削力及切削抗力的影响。罗靓等^[63]对碳纤维增强树脂基复合材料层合板低速冲击进行了试验研究，结果表明，复合材料的损伤形式以基体开裂和分层损伤为主。目前对复合材料切削的研究大多停留在切削力、表面损伤等表面现象的研究上，对基体破坏及亚表层损伤机制的研究还不够。路冬等^[64]进行了基于宏观各向异性碳纤维

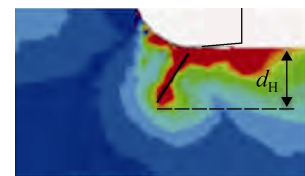
增强树脂基复合材料的切削仿真。模拟复合材料切削过程进行基体破坏分析，获得了进入稳定切削状态后的基体破坏分布规律。通过与实验获得基体破坏形貌比较可知，90°和 0°纤维方向复合材料基体破坏模拟分布图与实验结果吻合较好。路东等模拟复合材料切削过程对亚表面破坏进行了分析，获得了不同纤维方向下复合材料的亚表面损伤，如图 12 所示，由图可知，工件亚表面的损伤破坏起始于刀尖并沿着大致与纤维平行方向进行扩展延伸。



(a) 15° 纤维方向



(b) 45° 纤维方向



(c) 60° 纤维方向

图 12 不同纤维方向下 CFRP 复合材料工件亚表面损伤^[60]

5 结论

有限元仿真技术在金属切削加工过程的定量研究和工艺参数方面发挥了不可替代的作用。利用该技术可有效地节省时间，降低反复试验的次数，进而减少加工成本，有着传统的解析方法和实验方法难以达到的优点。相信仿真技术会在金属加工过程研究中有更长足的发展。其未来主要发展方向概括主要如下：

(1) 随着计算机技术的不断发展，研究人员不断地开发和创新的用于预测基本变量(I 阶段预测)的高精度分析模型，并将这些模型真正应用于预测

实际加工结果, 例如刀具寿命、表面完整性、切屑的形成与破坏、局部变形、加工稳定性等(II 阶段预测), 使得预测模型的预测结果更加可靠, 更能指导实际的工艺生产。

(2) 目前大多数基本变量和加工性能的评估都是通过二维模型预测的, 但从切削加工工艺上说, 三维模拟将是未来发展的方向。由于绝大多数的加工过程中工件和刀刃具有三维的几何特征, 采用如斜刃切削二维模型仿真不能够准确对切削过程实现仿真。故为了深入而准确的揭示切削机理, 三维模型模拟将会得到继续深入研究与发展。

(3) 大多数有限元模型都是基于连续介质的材料建模的, 但对于铸铁或复合材料的非均质材料还不能进行准确建模。对于金属加工有限元仿真来说, 最大的难题是没有稳定可靠的材料接触模型和材料本构模型。确保仿真模型的关键是仿真模型中材料属性能准确反映切削状态下的材料力学性能。新材料的不断涌现又会推动着材料本构模型的发展。

(4) 切削加工的本质是切屑和工件不断分离的过程, 目前关于断裂和分离的准则尚有不足。为使模拟和实际更加接近, 还必须对断裂和分离准则进一步研究。现阶段, 在切削加工过程中冷却液是必不可少的, 目前来说, 切削加工仿真中较少仿真模型考虑了冷却液或者冷却源对加工过程及表面质量等的影响。

(5) 精密、高速、绿色是切削加工的方向不断发展, 故建立应用于微细加工、高速加工、干式切削、有限元模型是非常必要的。由于加工表面完整性也是金属加工关注的重点对象, 所以结合仿真手段展开对加工表面质量控制的研究也是一个重要的发展方向。

参考文献:

- [1] Van Luttervelt C A, Childs T, Jawahir I S, et al. The State-of-the-Art of Modelling in Machining Processes [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* (S0007-8506), 1998, 47(2): 587-626.
- [2] P J Arrazola, T Özel, D Umbrello, et al. Recent advances in modelling of metal machining processes [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* (S0007-8506), 2013, 62(2): 695-718.
- [3] 岳彩旭. 硬态切削过程的有限元仿真与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学. 2010
- [4] Oxley PLB. Introducing Strain-Rate Dependent Work Material Properties into the Analysis of Orthogonal Cutting [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* (S0007-8506), 1964, 13: 127-138.
- [5] Oxley PLB. *The Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability* [M]. Chichester, England: Ellis Horwood Limited, 1989.
- [6] 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, The Netherlands, 1983: 541-547.*
- [7] 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 & Manufacture* (S0890-6955), 2008, 48(3): 275-288.
- [8] 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* (S0263-4368), 2009, 27(3): 595-604.
- [9] Calamaz M, Coupard D, Girot F. Numerical Simulation of Titanium Alloy Dry Machining with a Strain Softening Constitutive Law [J]. *Machining Science and Technology* (S1091-0344), 2010, 14(2): 244-257.
- [10] Guo Y B, Liu C R. Mechanical properties of hardened AISI 52100 steel in hard machining [J]. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* (S1087-1357), 2002, 124(1): 1-9.
- [11] Guo Y B. An Integral Method to Determine the Mechanical Behavior of Materials in Metal Cutting [J]. *Journal of Materials Processing Technology* (S0924-0136), 2003, 142(1): 72-81.
- [12] Guo Y B, Wen Q, Woodbury K A. Dynamic Material Behavior Modeling Using Internal State Variable Plasticity and its Application in Hard Machining Simulations [J]. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* (S1087-1357), 2006, 128(3): 749-759.
- [13] Karpal Y. Temperature Dependent Flow Softening of

- Titanium Alloy Ti6Al4V: An Investigation Using Finite Element Simulation of Machining [J]. *Journal of Materials Processing Technology (S0924-0136)*, 2011, 211(4): 737-749.
- [14] Burns T J, Mates S P, Rhorer R L, et al. Recent Results from the NIST Pulse-Heated Kolsky Bar [C]// *Proceedings of the 2007 Society for Experimental Mechanics*.
- [15] Chandrasekaran H, M'Saoubi R, Chazal H. Modelling of Material Flow Stress in Chip Formation Process from Orthogonal Milling and Split Hopkinson Bar Tests [J]. *Machining Science and Technology (S1091-0344)*, 2005, 9(1): 131-145.
- [16] Shi B, Attia H, Tounsi N. Identification of Material Constitutive Laws for Machining. Part I: An Analytical Model Describing the Stress, Strain, Strain Rate, and Temperature Fields in the Primary Shear Zone in Orthogonal Metal Cutting [J]. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering (S1087-1357)*, 2010, 132(5): 051008-051018.
- [17] Shi B, Attia H, Tounsi N. Identification of Material Constitutive Laws for Machining. Part II: Generation of the Constitutive Data and Validation of the Constitutive Law [J]. *ASME Journal of Manufacturing Science Engineering (S1087-1357)*, 2010, 132(5): 051009-051017.
- [18] Shatla M, Kerk C, Altan T. Process Modeling in Machining. Part I: Determination of Flow Stress Data [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture (S0890-6955)*, 2001, 41(10): 1511-1534.
- [19] Oxley PLB. *The Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability* [M]. Chichester, England: Ellis Horwood Limited, 1989.
- [20] Özel T, Zeren E. A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining [J]. *ASME Journal of Manufacturing Science & Engineering (S1087-1357)*, 2006, 128(1): 119-129.
- [21] Shrot A, Bäker M. Determination of Johnson-Cook Parameters from Machining Simulations [J]. *Computational Materials Science (S0927-0256)*, 2012, 52(1): 298-304.
- [22] Leopold J, Wohlgenuth R. Modeling and Simulation of Burr Formation: State-of-the-Art and Future Trends [C]// *Conference on Burrs, Analysis, Control and Removal*, 2009.
- [23] Rizzuti S. *Fundamental Aspects in Metal Cutting Modelling* [D]. Calabria, Italy: University of Calabria, 2009.
- [24] 赵玢, 施志辉. 切屑生成、卷曲、折断过程的实时仿真研究 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2000, 8: 14-17.
- [25] 盆洪民. 淬硬钢高速切削过程的有限元仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2007.
- [26] Davies M A, Burns T J. Thermo-Mechanical Oscillations in Material Flow During High-Speed Machining [C]// *Proceedings of the Royal Society*. 2001, 359: 821-846.
- [27] Molinari A, Musquar C, Sutter G. Adiabatic Shear Banding in High Speed machining of Ti-6Al-4V: Experiments and Modelling [J]. *International Journal of Plasticity (S0749-6419)*, 2002, 18(4): 443-459.
- [28] Pawade R S, Sonawane H A, Joshi S S. An Analytical Model to Predict Specific Shear Energy in High-Speed Turning of Inconel 718 [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture (S0890-6955)*, 2009, 49(12-13): 979-990.
- [29] Guo Y B, Dornfeld D A. Finite Element Modeling of Burr Formation Process in Drilling 304 Stainless Steel [J]. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering (S1087-1357)*, 2000, 122(4): 612-619.
- [30] Guo Y B, Liu C R. 3D FEA Modeling of Hard Turning [J]. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering (S1087-1357)*, 2002, 124(2): 189-199.
- [31] Fischer C E. Some Discussions of the Virtual Testing of Cutting Tools [C]// *Proceedings of the 2008 International Manufacturing Science & Engineering Conference (ASME-MSEC2008)*, October 7-10, Evanston, Illinois, USA. 2008: 1-8.
- [32] 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 & Manufacture (S0890-6955)*, 2008, 48(3-4): 275-288.
- [33] 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 (S0263-4368)*, 2009, 27(3): 595-604.
- [34] Oxley P L B. *Mechanics of Machining* [M]. Chichester, England: Ellis Horwood, 1989.
- [35] Tugrul Ozel, Taylan Altan. Process simulation using finite element method — prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in high speed flat end milling [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture (S0890-6955)*, 2000, 40(5): 713-738.
- [36] L Filice, D Umbrello, F Micari, et al. On the Finite

- Element Simulation of Thermal Phenomena in Machining Processes [M]. 2007: 263-278.
- [37] Guo Y B, Liu C R. Mechanical properties of hardened AISI 52100 steel in hard machining process [J]. *J Manuf Sci Eng (S1087-1357)*, 2002, 124(1): 1-9.
- [38] 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.
- [39] E G Ng, D K Aspinwall, D Brazil, et al. Modelling of Temperature and Forces When Orthogonally Machining Hardened Steel [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture (S0890-6955)*, 1999, 39(6): 885-903.
- [40] Xie L J, Schmidt J, Schmidt C, et al. 2D FEM Estimate of Tool Wear in Turning Operation [J]. *Wear (S0043-1648)*, 2005, 258(10): 1479-1490.
- [41] Attanasio A, Ceretti E, Rizzuti S, et al. 3D Finite Element Analysis of Tool Wear in Machining [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology (S0007-8506)*, 2008, 57(1): 61-64.
- [42] Attanasio A, Umbrello D. Abrasive and Diffusive Tool Wear FEM Simulation [J]. *International Journal of Material Forming (S1960-6206)*, 2009, 2(1): 543-546.
- [43] 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 (S0007-8506)*, 2010, 59(1): 77-82.
- [44] Attanasio A, Ceretti E, Fiorentino A, et al. Investigation and FEM-Based Simulation of Tool Wear in Turning Operations with Uncoated Carbide Tools [J]. *Wear (S0043-1648)*, 2010, 269(5/6): 344-350.
- [45] Jawahir I S, Brinksmeier E, M'Saoubi R, et al. Surface Integrity in Material Removal Processes: Recent Advances [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology (S0007-8506)*, 2011, 60(2): 603-626.
- [46] Barash M M, Schoech W J. A Semi-analytical Model of the Residual Stress Zone in Orthogonal Machining [C]// *Proceedings of 11th International MTDR Conference*. London, UK: Pergamon Press, 1970.
- [47] Wu D W, Matsumoto Y. The Effect of Hardness on Residual Stresses in Orthogonal Machining of AISI 4340 Steel [J]. *Journal of Engineering for Industry –Transactions of the ASME (S0022-0817)*, 1990, 112(3): 245-252.
- [48] Liang S Y, Su J C. Residual Stress Modeling in Orthogonal Machining [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology (S0007-8506)*, 2007, 56(1): 65-68.
- [49] Liang S Y, Hanna C R, Chao R M. Achieving Machining Residual Stresses Through Model-Driven Planning of Process Parameters [J]. *Transactions of NAMRI/SME (S1047-3025)*, 2008, 36: 445-452.
- [50] Ulutan D, Erdem Alaca B, Lazoglu I. Analytical Modeling of Residual Stresses in Machining [J]. *Journal of Materials Processing Technology (S0924-0136)*, 2007, 183(1): 77-87.
- [51] Lazoglu I, Ulutan D, Alaca B E, et al. An Enhanced Analytical Model for Residual Stress Prediction in Machining [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology (S0007-8506)*, 2008, 57(1): 81-84.
- [52] Chen L, El-Wardany T I, Harris W C. Modelling the Effects of Flank Wear Land and Chip Formation on Residual Stresses [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology (S0007-8506)*, 2004, 53(1): 95-98.
- [53] Valiorgue F, Rech J, Hamdi H, et al. 3D Modelling of Residual Stresses Induced in Finish Turning of an AISI 304L Stainless Steel [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture (S0890-6955)*, 2012, 53(1): 77-90.
- [54] Mondelin A, Valiorgue F, Rech J, et al. Hybrid Model for the Prediction of Residual Stresses Induced by 15-Sph Steel Turning [J]. *International Journal of Mechanical Science (S0020-7403)*, 2012, 58(1): 69-85.
- [55] H Dehmani, F Salvatore, H Hamdi. Numerical study of residual stress induced by multi-steps orthogonal cutting [C]// *14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO)*, *Procedia CIRP 8 (2013)*. 2013: 299-304.
- [56] 全燕鸣, 叶邦彦. 复合材料的切削加工表面与表面粗糙度 [J]. *复合材料学报*, 2001, 18(4): 128-132.
- [57] Arola D, Ramulu M. Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis [J]. *International Journal of Mechanical Sciences (S0020-7403)*, 1997, 39(5): 597-613.
- [58] Ramesh M V, Seetharamu K N, Ganesan N, et al. Analysis of machining of FRPs using FEM [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture (S0890-6955)*, 1998, 38(12): 1531-1549.
- [59] Mahdi M, Zhang L. A finite element model for the orthogonal cutting of fiber-reinforced composite materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology (S0924-0136)*, 2001, 113(1): 373-377.
- [60] Iliescu D, Gehin D, Iordanoff I, et al. A discrete element method for the simulation of CFRP cutting [J]. *Composites Science and Technology (S0266-3538)*, 2010, 70(1): 73-80.

(下转第 832 页)

<http://www.china-simulation.com>