

7-31-2020

Finite Element Simulation of Machining 7075 Aluminum Alloy Based on AdvantEdge and Corresponding Experimental Study

Yusong Liao

1. Department of Mechanical and Automotive Engineering, Chuzho Vocational and Technology College, Chuzhou 239000, China; ;

Han Jiang

2. Institute of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230003, 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.

Finite Element Simulation of Machining 7075 Aluminum Alloy Based on AdvantEdge and Corresponding Experimental Study

Abstract

Abstract: Abstract: The finite element simulation of cutting 7050 aluminum alloy was carried out based on the software of AdvantEdge, and Johnson-Cook constitutive model was chosen for the workpiece material in the model. The parameters for the constitutive model were obtained through the Hopkinson experiment. The cutting forces and surface qualities were observed through different cutting velocities and cutting depths. The cutting velocity and cutting depth were optimized, and the experiment was carried out with the guidance of the simulation results. The machined workpiece obtained from the experiment shows that the optimized cutting parameters can improve the machined surface property greatly, so it can be concluded that the finite element simulation can provide significant guidance to the machining process in practice.

Keywords

Advantedge, aluminum alloy, cutting, finite element, constitutive model

Recommended Citation

Liao Yusong, Han Jiang. Finite Element Simulation of Machining 7075 Aluminum Alloy Based on AdvantEdge and Corresponding Experimental Study[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7): 1496-1501.

基于 AdvantEdge 的 7050 铝合金切削参数优化及实验研究

廖玉松¹, 韩江²

(1. 滁州职业技术学院 机械与汽车工程系, 滁州 239000; 2. 合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 合肥 230003)

摘要: 在有限元软件 AdvantEdge 中对工业常用材料 7050 铝合金的切削加工过程进行了模拟仿真。仿真中所用被加工材料的本构模型为 Johnson-Cook 模型, 通过 Hopkinson 杆冲击实验得到了 7050 铝合金该本构模型的参数。通过变化模型的切削速度和切深, 观察仿真结果中刀具所受到的切削力和零件表面加工质量, 对切削速度和切深度进行优化, 并用其优化后的切削参数对实际零件进行加工, 结果表明采用优化后的切削参数能明显提高加工质量, 说明有限元切削仿真对提高实际加工效率和加工质量具有重要意义。

关键词: AdvantEdge; 铝合金; 切削; 有限元; 本构模型

中图分类号: TH128

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 07-1496-06

Finite Element Simulation of Machining 7075 Aluminum Alloy Based on AdvantEdge and Corresponding Experimental Study

Liao Yusong¹, Han Jiang²

(1. Department of Mechanical and Automotive Engineering, Chuzhou Vocational and Technology College, Chuzhou 239000, China;

2 Institute of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230003, China)

Abstract: The finite element simulation of cutting 7050 aluminum alloy was carried out based on the software of AdvantEdge, and Johnson-Cook constitutive model was chosen for the workpiece material in the model. The parameters for the constitutive model were obtained through the Hopkinson experiment. The cutting forces and surface qualities were observed through different cutting velocities and cutting depths. The cutting velocity and cutting depth were optimized, and the experiment was carried out with the guidance of the simulation results. The machined workpiece obtained from the experiment shows that the optimized cutting parameters can improve the machined surface property greatly, so it can be concluded that the finite element simulation can provide significant guidance to the machining process in practice.

Keywords: Advantedge; aluminum alloy; cutting; finite element; constitutive model

引言

在 21 世纪的机械制造领域中, 传统的金属切削加工将依然会是最主要的机械加工方式^[1-2]。随

着工业的不断发展, 对该领域的技术提出了更高更苛刻的要求。由于金属切削过程是一个伴随着高温、高压以及高应变率的塑性大变形过程^[3-6], 其过程参数的多样性和复杂性, 使得该过程所发生的现象无法用解析法来进行具体分析^[7]。借助于当今社会计算机技术突飞猛进的发展, 使得基于有限元分析的模拟仿真过程对于金属切削过程的具体分析成为可能, 其可以帮助相关技术人员能够更好地



收稿日期: 2015-01-13 修回日期: 2015-03-14;
基金项目: 国家自然科学基金(51275147);
作者简介: 廖玉松(1969-), 男, 安徽, 硕士, 副教授, 研究方向为 CAD/CAM, 数控加工与编程; 韩江(1963-), 男, 河南, 项城市, 博士, 教授, 博导, 研究方向为数控技术和 CMIS 系统。

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

• 1496 •

了解金属切削过程的一些变化机理并对其进行具体分析, 因此基于有限元技术的金属切削仿真具有划时代的意义^[8]。

基于有限元技术的切削仿真过程, 其结果是否准确的最为关键的因素为所用材料的本构模型是否能准确表达在切削过程材料所发生的变化, 这往往是决定仿真成败的关键^[9]。目前在切削有限元仿真技术方面, 国内外有不少学者在该方面有一定的工作量^[10], 但是对于工业常用材料 7050 铝合金目前并未有确定的本构模型参数, 使得其仿真过程的可靠性不高, 其仿真结果没有很强的说服力, 为此, 本文通过 Hopkinson 杆实验获取 7050 铝合金的 Johnson-Cook 本构模型参数, 并将其运用于有限元仿真过程中, 并通过具体实验对仿真结果进行验证, 最终得出结论: 通过 Hopkinson 杆实验获得的 7050 铝合金材料的 Johnson-Cook 本构模型参数在有限元仿真过程中能够较为准确实现切削过程的模拟, 其为工业的加工过程提供了可靠的优化参数, 并且从侧面说明了基于有限元技术的金属切削仿真对于提高生产效率、加工质量以及节约成本具有重要意义。

1 工件以及刀具材料本构模型

1.1 7050 合金本构模型

目前在切削仿真过程中使用到的工件材料的本构模型主要有 Bodner-Paton, Zerrilli-Armstrong, Follansbee-Kocks, Johnson-Cook 等模型, 其中由于 Johnson-Cook 本构模型综合考虑了应变硬化、应变率硬化以及高温软化效应, 因此该本构模型在切削仿真中使用最为广泛^[11], 其表达式为:

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

其中材料的应变强化效应由第 1 项来表征, 材

料的应变速率对于流动应力的作用由第 2 项来表征, 流动应力受温度的影响由第 3 项来表征, T_r , $\dot{\varepsilon}_0$ 分别为参考温度以及参考应变率; T_m 为材料的熔点; A , B , n , C , m , D , k 为本构模型中 7 个待定参数, 材料的硬度强化系数分别由 A , B , n 来表征, 材料的应变速率强化系数由 C 来表征, 材料的热软化系数由 m 来表征。

近年来, 在被加工材料的本构模型研究中, 分离式 Hopkinson 杆冲击实验的运用越来越广泛^[12], 其对材料高应变率下本构模型参数的获取颇为有效。本文所用 7050 铝合金的 Johnson-Cook 模型参数同样采用分离式 Hopkinson 杆实验装置得到。通过在不同温度和不同应变率下对工件材料进行一系列的冲击试验, 最终得到了该材料的流动应力曲线, 同时采用神经网络模型最终得到了其 Johnson-Cook 本构模型参数。后期的实验结果和仿真数据表明分离式 Hopkinson 杆冲击实验是一种较为有效的探索高应变、高应变率以及温度变化较大场合下材料的本构模型参数的有效手段, 其为诸多金属切削有限元仿真提供了较为可靠的模型参数, 从而保证了仿真结果的可靠性。

最终得到的 7050 铝合金材料的 Johnson-Cook 本构模型参数如表 1 所示。

表 1 7050 Johnson-Cook 模型材料参数

材料	A(Mpa)	B(Mpa)	n	c	m
7050	370.4	1 798.7	0.733 15	0.012 8	1.528 2

1.2 7050 失效模型

在本文的仿真过程中, 工件材料的失效准则所采用的是剪切失效准则, 其表达式为:

$$\omega = \frac{\bar{\varepsilon}_0^{pl} + \sum \Delta \varepsilon^{pl}}{\bar{\varepsilon}_f^{pl}} \quad (2)$$

式中: ω 为材料的失效参数; $\bar{\varepsilon}_0^{pl}$ 为材料的初始等效应变值; $\bar{\varepsilon}^{pl}$ 为材料的等效塑性应变增量; $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ 为材料的失效应变值。当失效参数 ω 的值达到 1 时即判断材料发生失效^[13], 从而实现模型中的切屑与工件体的分离。其中材料的失效应变通过

Johnson-Cook 的失效模型进行定义, 其表达式为:

$$\bar{\varepsilon}_f^{pl} = \left[d_1 + d_2 \exp \left(d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_o} \right) \right] \left(1 + d_5 \frac{\theta}{\theta_{melt}} \right) \quad (3)$$

其中: $\dot{\varepsilon}^{pl}$ 为塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_o$ 为参考应变率; $d_1 - d_5$ 表示在低于转变温度下失效参数; θ 由式(4)表达:

$$\begin{cases} 0 & \text{for } \theta < \theta_{transition} \\ (\theta - \theta_{transition}) / (\theta_{melt} - \theta_{transition}) & \text{for } \theta_{transition} \leq \theta \leq \theta_{melt} \\ 1 & \text{for } \theta > \theta_{melt} \end{cases} \quad (4)$$

其中: θ 为材料的当前温度; θ_{melt} 为材料的融化温度; $\theta_{transition}$ 为室温。通过实验, 最终 $d_1 - d_5$ 的值为 -0.09, 0.25, -0.5, 0.014, 3.87, 其熔点 θ_{melt} 为 660 °C, 室温 $\theta_{transition}$ 取 20 °C。

1.3 刀具材料参数

实际实验中所用刀具的材料为硬质合金, 在仿真过程中需要用到的刀具材料的模型参数如表 2 所示。

表 2 刀具材料参数

杨氏模量(Mpa)	泊松比	线膨胀系数(m/m.°C)	比热(J/kg.°C)	导热率(W/m.k)
8E+11	0.22	4.7E-6	200	4.6E1

由于仿真所模拟的切削过程很短, 因此该过程并未考虑刀具的磨损量, 且忽略刀具的震动对于加工的影响, 模型中主要考虑的是刀具与工件之间摩擦和热传递对最终结果的影响。

1.4 摩擦模型

在实际的切削过程中, 刀具与工件材料之间所发生的摩擦情况较为复杂, 在仿真模型中往往将摩擦区简化为滑动区与粘结区, 其主要与工件材料的临界剪切力相关, 而在滑动区刀具与工件之间的摩擦系数可以视作一个不变的常数^[14], 其表达式为:

$$\tau_c = \min(\mu\sigma_n, \tau_s) \quad (5)$$

其中: τ_c 为在工件接触面所产生的滑动剪切应力, σ_n 为接触面的正应力; μ 为刀具与工件之间的摩擦系数, 在本仿真中取值 0.4; τ_s 为工件材料的临界屈服压力。

2 有限元计算

为了简化模型, 本文所进行的有限元仿真基于以下假设条件: (1)在切削过程中工件的被切除材料的厚度始终保持一致, 因此该过程可以按照平面对象进行处理; (2)忽略刀具和工件之间所发生的震动; (3)不考虑在加工过程中由于温度的升高而引起的工件材料的相变及其他化学变化; (4)工件的材料各向同性; (5)忽略刀具的磨损。

采用 AdvantEdge 软件的网格自适应技术, 在材料被去除部分的区域由于将会发生大变形, 该部分在仿真过程其网格将会不断进行重新划分, 最终使得每个增量步后模型的网格都不至于发生太大的畸变而使得仿真无法继续。工件内的应变, 应力, 部分区域温度的变化, 表面加工质量, 以及刀具所受到的切削力都是仿真着重需要观察的量。

设定预定的切削速度和切削深度, 最终仿真结果如图 1 所示, 通过观察模型中所得到的切屑形状, 其呈现连续的带状, 其与实际实验中形成的切屑形状较为符合, 根据此结果可以初步判断此仿真结果的准确性是比较可靠的。

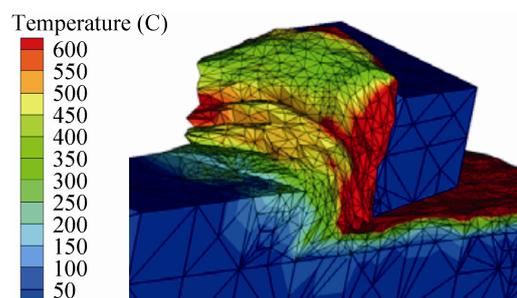


图 1 切削仿真结果效果图

3 结果分析

3.1 切削速度对仿真结果的影响

为考察切削速度对于仿真结果的影响, 在仿真

中保持切削深度为 0.08 mm, 改变模型中的切削速度, 使得其分别取值为 503 m/min, 535 m/min, 564 m/min, 596 m/min, 627 m/min。

最终发现在 Y 向(即垂直于被加工面的方向)的受力较小, 基本在零附近徘徊, 没有太大的变化, 而在切削方向所受到的力会在 100 ~150 N 之间进行波动。最终得到的在切削方向的切削力随切削速度的变化趋势如图 2 所示。

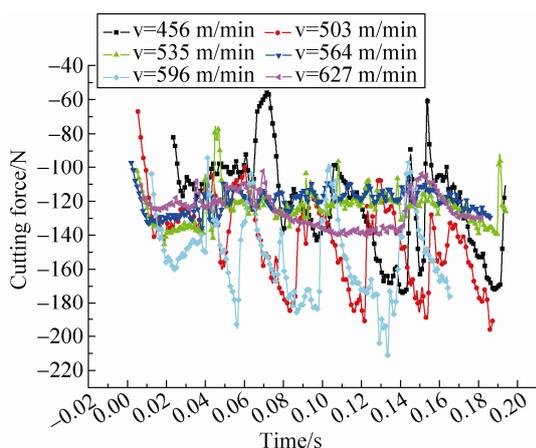


图 2 切削深度为 0.08 mm 切削速度取不同值得到的切削力

可以看到切削力与切削速度并不存在较为规则的比例关系, 在时间为 5×10^{-6} s 时刀具的受力呈现一个较为明显的波动, 这主要归结于在模型中切削速度是从 0 线性增加到指定的速度的, 当达到 5×10^{-6} s 时刻切削速度达到预定的最大值, 并保持恒定, 其会表现在所受到的切削力有一个较为明显的波动。在实际实验过程中此现象并不真正存在, 因此在模型中的这一段可以不予考虑, 下面分别对不同切削速度得到的结果进行讨论:

(1) 切削速度 $v_c = 456$ m/min, 切削力 $F_c \approx 125$ N, 切削力曲线波动较大, 工件表面质量一般;

(2) 切削速度 $v_c = 503$ m/min, 切削力 $F_c \approx 150$ N, 切削力曲线波动较大, 工件表面质量很差;

(3) 切削速度 $v_c = 535$ m/min, 切削力 $F_c \approx 120$ N, 切削力曲线波动较平缓, 工件表面质量较好;

(4) 切削速度 $v_c = 564$ m/min, 切削力 $F_c \approx 120$ N, 切削力曲线波动较平缓, 工件表面质量较好;

(5) 切削速度 $v_c = 596$ m/min, 切削力 $F_c \approx 150$ N, 切削力曲线波动较大, 工件表面质量较好;

(6) 切削速度 $v_c = 627$ m/min, 切削力 $F_c \approx 125$ N, 应力曲线波动较平缓, 工件表面质量一般。

根据分析结果, 可以得出结论: 刀具所受到的切削力随着切削速度的变化不断变化, 当切削速度在 535~564 m/min 时刀具所受到的切削力的波动较为平缓, 综合考虑切削力的波动和工件表面加工质量, 切削速度可取 564 m/min。

3.2 切削深度仿真结果的影响

为了考察切削深度对于仿真结果的影响, 在仿真中保持切削速度为 520 m/min 不变, 而改变模型的切削深度, 其取值分别为 0.08 mm, 0.10 mm, 0.12 mm, 0.14 mm, 0.16 mm, 最终同样发现在 Y 向的受力较小, 而在切削方向所受到的力会在 125 N~200 N 之间进行波动, 如图 3 所示。

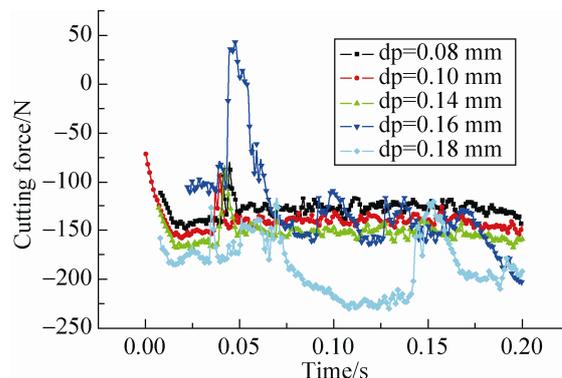


图 3 切削参数为 $v=534$ m/min, $dp=0.08$ mm 的仿真切削力

根据观察可知, 在刀具的受力曲线的初始段同样会呈现一个较为明显的波动, 原因前面已经描述。随着切削深度的增加, 切削力呈现较为明显的增加趋势, 具体分析如下:

(1) 切削深度 $dp=0.08$ mm, 切削力 $F_c \approx 125$ N, 切削力曲线较平缓, 工件表面质量较好;

(2) 切削深度 $dp=0.1$ mm, 切削力 $F_c \approx 140$ N, 切削力曲线较平缓, 工件表面质量较好;

(3) 切削深度 $dp=0.12$ mm, 切削力 $F_c \approx 150$ N, 切削力曲线较平缓, 工件表面质量较好;

(4) 切削深度 $dp=0.14$ mm, 切削力 $F_c \approx 160$ N, 切削力曲线波动较大, 工件表面质量较差;

(5) 切削深度 $dp=0.16$ mm, 切削力 $F_c \approx 200$ N, 切削力曲线波动较大, 工件表面质量较差。

综合考虑切削力的波动和工件表面加工质量, 取切削深度 $dp=0.08$ mm。

4 加工过程

实验所用 CKA6150 车床如图 4 所示, 测量切削力所用的为瑞士生产的型号为 Kistler9347C 的三向测力仪, 如图 5 所示。



图 4 实验加工所用 CA6140 机床



图 5 瑞士奇石乐 Kistler9347C 三向测力仪

仿真所用的模型为正交切削模型, 而实际实验中的切削过程为斜切, 因此会使得仿真得到的切削力与实际实验得到的切削力存在一定的偏差, 但是两者的变化趋势是一致的。在实验中, 切削速度取了 3 组数据, 分别为 502 m/min, 563 m/min, 595 m/min, 最终通过测力仪测得的 3 种切削速度下的切削力如图 6 所示。

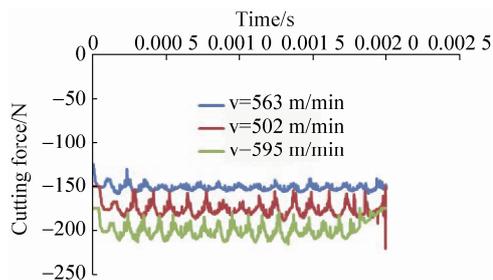


图 6 不同切削速度下测得的切削力

根据实际测得的结果可得到, 在切削速度为 $v=563$ m/min 下, 切削力以及其波动均最小, 此结果与前期有限元仿真结果一致。

另外再取 3 组切削深度分别进行实验, 所取值分别为 0.08 mm, 0.1 mm, 0.14 mm, 测力仪最终测得的不同切削深度下的切削力如图 7 所示。

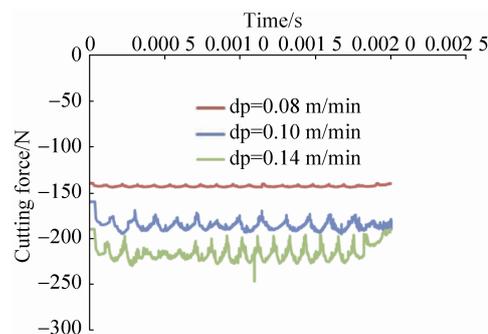


图 7 不同切削深度下测得的切削力

结果显示, 当切削深度为 $dp=0.08$ mm 时所测得的切削力及其波动均最小, 此结果同样与前期的有限元仿真结果一致。

根据实际实验和仿真的建议, 切削速度和切深分别取 $v=563$ m/min, $dp=0.08$ mm, 在该切削参数下最终得到加工后的零件如图 8 所示, 可以看出, 该零件的表面加工质量是很高的, 与其他切削参数加工得到的零件相比, 可以发现经过优化后的切削参数得到的零件的表面质量占有明显的优势。



图 8 加工完成后的 7050 铝合金零件

5 结论

合适的材料本构模型的选取是本文仿真成功的关键因素。本文通过 Hopkinson 杆冲击实验得到了 7075 铝合金的 Johnson-Cook 本构模型的参数, 并基于该模型以及相应的参数, 对其切削过程进行有限元模拟仿真, 综合考虑切削力, 切削力的波动以及零件表面加工质量最终取优化后的切削参数为: 切削速度取 $v_c = 563 \text{ m/min}$, 切削深度取 $dp = 0.08 \text{ mm}$ 。通过实际加工过程的验证, 在该切削参数下切削力较小, 其波动较为缓和, 与未优化的切削参数相比, 其得到的零件的表面加工质量占有明显的优势, 最终可以得出结论为: 基于 AdvantEdge 的有限元切削仿真其结果的可信度很高, 其优化得到的切削参数对于提高生产效率和加工质量具有重要意义, 在工业中可以较为广泛使用以提高企业的效益。

参考文献:

- [1] 赵云峰, 程丽, 祁荣先, 等. 并联机床虚拟样机建模与加工过程动力学仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(2): 357-361.
- [2] 孟龙晖, 何宁, 李亮. TC4 管状零件内壁加工残余应力计算及其有限元分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(19): 2583-2587.
- [3] Meng Longhui, He Ning, Yang Yinfei, *et al.* Method for Measuring Residual Stresses Induced by Boring in Internal Surface of Tube and Its Validation with XRD Method [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (S1005-1120), 2014, 31(5): 508-514.
- [4] 孟龙晖, 何宁, 李亮, 等. TC4 零件铣削加工残余应力自平衡前值的测量及其有限元分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(8): 1991-1996.
- [5] Meng Longhui, He Ning, Li Liang, *et al.* Measurement of Pre-Self-Balanced Surface Residual Stresses Induced by Milling in Titanium Alloys and the FEM Validation [C]// Advanced Materials Research. 2014, 996: 615-621.
- [6] 孟龙晖, 何宁, 杨吟飞, 等. 利用 FEM 修正法测量 Ti6Al4V 管件表面残余应力[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(5): 71-75.
- [7] 盛精, 苑伟政, 耿文轩. 基于切削仿真的刀具-工件的参数化三维建模[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(1): 65-68.
- [8] Strenkowski J S, Carroll J T. A finite element model of orthogonal metal cutting [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering (S1087-1357), 1985, 107(4): 349-354.
- [9] 黄志刚, 柯映林, 王立涛, 等. 基于正交切削模拟的零件铣削加工变形预测研究[J]. 机械工程学报, 2005, 40(11): 117-122.
- [10] 宿崇, 唐亮, 侯俊铭, 等. 基于 FEM 与 SPH 耦合算法的金属切削仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(16): 5002-5005.
- [11] Bayly P V, Halley J E, Mann B P, *et al.* Stability of interrupted cutting by temporal finite element analysis [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering (S1087-1357), 2003, 125(2): 220-225.
- [12] Liu C R, Guo Y B. Finite element analysis of the effect of sequential cuts and tool-chip friction on residual stresses in a machined layer [J]. International Journal of Mechanical Sciences (S0020-7403), 2000, 42(6): 1069-1086.
- [13] 庞迎春, 李迎. 基于 ALE-FEM 法的微切削刀刃钝圆效应的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(2): 353-356.
- [14] 路冬, 蔡力钢, 杨铭铭. 基于 MSG 理论的微切削加工有限元仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(12): 933-944.