

铝合金 6061 微尺度铣削的铣削力仿真与实验研究

蔡明¹, 巩亚东¹, 于宁², 高奇¹
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 采用有限元仿真和单因素实验相结合的方法,研究了铝合金 6061 微尺度铣削的铣削力影响因素. 建立了刀具和工件的三维模型并对其进行装配和网格划分,通过有限元仿真模拟了铝合金 6061 材料的微尺度铣削过程,得到了铣削速度和铣削深度对铣削力的影响规律,并进行了单因素实验研究. 结果表明:随着主轴转速的不断增大,铣削力先增大后减小,转折点为 24 000 r/min;随着铣削深度的不断增大,铣削力先增大后减小再增大,转折点为 10 μm 和 12 μm ;随着进给速度的不断增大,铣削力也不断增大. 优选出铝合金 6061 材料微尺度铣削最优工艺参数组合为:主轴转速 48 000 r/min,铣削深度 5 μm ,进给速度 20 $\mu\text{m/s}$.
关 键 词: 铝合金 6061;微尺度铣削;铣削力;有限元仿真;单因素实验;最优工艺参数
中图分类号: TH 161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)01-0076-06

Simulation and Experimental Study on the Milling Force of Aluminum Alloy 6061 in Micro-milling

CAI Ming¹, GONG Ya-dong¹, YU Ning², GAO Qi¹
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Information Science & Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China. Corresponding author: CAI Ming, E-mail: caiming199004@126.com)

Abstract: The finite element simulation and single factor experiment were combined to carry out the research of the influential factors for the milling force of aluminum alloy 6061 in micro-milling. The three-dimensional model of the tool and workpiece was established and assembled, and the mesh was also divided. The micro-milling process of aluminum alloy 6061 material was simulated, and the influence of milling speed and milling depth on the milling force was obtained by the finite element simulation. The single factor experimental study was also conducted. The results showed that: with the increase of spindle speed, the milling force increases first and then decreases, whose turning point is 24 000 r/min; with the increase of milling depth, the milling force increases first and then decreases and increases, whose turning point is 10 μm and 12 μm ; with the increase of feed rate, the milling force also increases. The optimized parameter combination of aluminum alloy 6061 material in micro-milling is as follows: the spindle speed is 48 000 r/min, the milling depth is 5 μm , and the feed rate is 20 $\mu\text{m/s}$.
Key words: aluminum alloy 6061; micro-milling; milling force; finite element simulation; single factor experiment; optimized parameter

随着机械加工技术的飞速发展,先进制造技术在加工精度、效率和成本等方面不断向前发展的同时,在加工尺寸方面也在不断向前发展^[1],这样,微细加工技术就应运而生了,微尺度铣削就是其中的重要加工方法之一. 微尺度铣削加工与传统宏观铣削加工在加工机理、加工条件和加工用量等诸多方面具有较大差异,微尺度铣削加工是对微小结构零件进行精密切削加工的一种机械加工方法,目前已经成为微小三维复杂形状零件精密切削加工的重要方法之一^[2]. 微尺度铣削加

工技术已经在航空航天和国防等领域中得到广泛应用,其具有广阔的发展前景和研究价值,目前已成为机械加工领域的一个研究热点。

国内外的研究机构和学者对微尺度铣削开展了一定的研究^[3-8],但利用仿真和实验相结合对铝合金 6061 材料微尺度铣削的铣削力研究还鲜有报道. 针对铝合金材料越来越广泛的应用前景,本文对铝合金 6061 的微尺度铣削进行了深入的仿真和实验研究. 首先利用有限元仿真的方法,模拟铝合金 6061 的微尺度铣削过程,并分析铣削速度和铣削深度对铣削力的影响;然后利用单因素实验的方法,分析各铣削参数对铣削力的影响,优选出合理的微尺度铣削工艺方案。

1 微尺度铣削的铣削力仿真研究

1.1 微尺度铣削模型的建立

本文利用 ABAQUS 有限元分析软件对铝合金 6061 微尺度铣削加工过程中的铣削力进行有限元仿真研究. 有限元仿真与后文实验过程中刀具的几何参数相同,二者的对比情况如图 1 所示. 本文采用直径为 0.6 mm,前角为 10°,后角为 6°,刀尖圆弧半径为 5 μm 的双刃微铣刀进行仿真研究与实验研究. 在微尺度铣削加工过程中,刀具上只有切削刃附近的部分参与切削加工过程,为了进一步简化刀具模型,本文仿真过程中忽略了刀具的长度. 仿真中将刀具定义为解析刚体,将刀具顶部中心设定为参考点. 为了提高有限元仿真过程的计算效率,将工件尺寸设定为 0.8 mm × 0.9 mm × 0.2 mm,将工件属性定义为可变形材料。

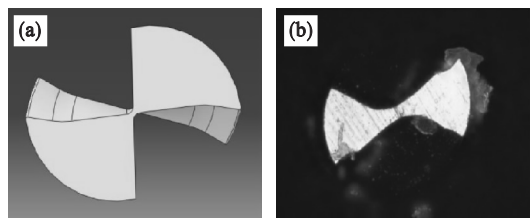


图 1 仿真与实验中刀具的对比
Fig. 1 Comparison of the tools used in simulation and experiment

(a)—仿真中的刀具;(b)—实验中的刀具.

仿真工件材料选择在航空航天等领域应用广泛的铝合金 6061,模型采用 Johnson – Cook 本构模型,综合考虑了应变、应变率和温度等相关因素对仿真过程的影响. 铝合金 6061 材料的物理参数为:密度 2 700 kg/m³,弹性模量 690 GPa,泊松比

0.33,热传导率 166.9 W/(m·K),热膨胀系数 2.4 × 10⁻⁵ K⁻¹,比热容 896 J·(kg·K)⁻¹. 其 Johnson – Cook 本构参数为: A = 266.83 MPa, B = 126.83 MPa, C = 0.082 72, n = 0.258 3, m = 1.25.

1.2 装配与网格划分

建立刀具和工件的三维模型后对二者进行装配,并对二者的相对位置关系进行调整,为了提高计算效率,尽量保证刀具和工件充分接近且不产生干涉,刀具和工件的装配图如图 2 所示。

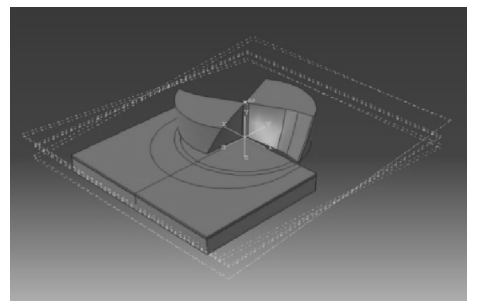


图 2 刀具和工件装配图
Fig. 2 Assembling drawing of the tool and workpiece

微尺度铣削过程是一个瞬时的过程,可以近似地认为在这个瞬时过程中切削所产生的热量还没有及时传导出去,因此仿真选择动态绝热分析. 仿真分析步时间越长,计算精度就越高,但相应计算时间也就越长,因此要选择一个合适的分析步时间,综合考虑上述情况,仿真分析步时间定为 0.001 25 s.

仿真中对刀具施加刚体约束,令刀具的切削刃与工件上表面接触,并令刀具以指定的铣削速度和铣削深度对工件的微尺度铣削加工过程进行有限元仿真. 仿真采用位移加载的方法,加载点为刚体刀具的参考点。

分别对建立好的刀具和工件的三维模型进行网格划分. 切削过程是一种非线性很强的本构关系,如果网格划分过于粗糙,可能会造成分析结果不收敛,特别是切屑部分,其网格密度会直接影响仿真的效果,所以仿真中对切削的重点部位进行网格细化. 例如,工件中与刀具接触部位的网格划分得较细,为了节省计算时间和提高计算效率,工件其他部位的网格则划分得相对较粗;刀具中切削刃平面的网格划分得较细,刀具其他部位的网格则划分得相对较粗,工件和刀具网格的划分情况如图 3 所示。

1.3 不同铣削速度下的仿真与结果分析

仿真采用后文实验中的工艺参数,将主轴转速 12 000,24 000,36 000,42 000,48 000 r/min 和刀具直径 0.6 mm 折算成对应的铣削速度分别为

376.8,753.6,1 130.4,1 318.8,1 507.2 mm/s,铣削深度恒定为 10 μm,对铝合金 6061 加工过程中

的铣削力进行仿真研究,探究铣削速度对铣削力(合力)的影响.

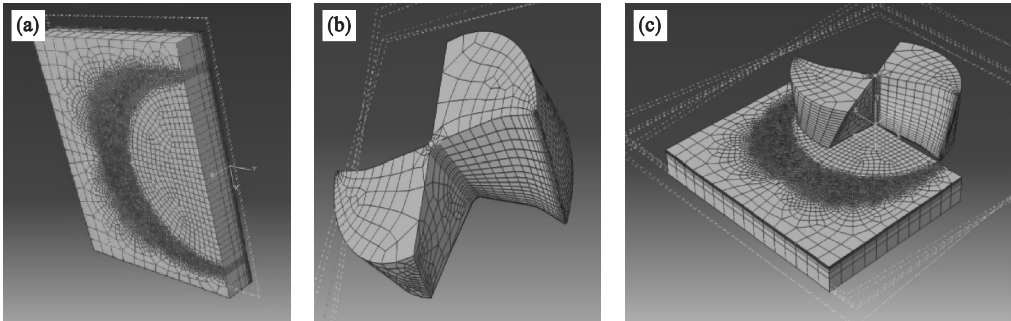


图 3 网格划分
Fig. 3 Mesh division
(a)—工件; (b)—刀具; (c)—装配.

下面利用仿真分析微尺度铣削加工过程,仿真中铣削速度为 753.6 mm/s,铣削深度为10 μm.微尺度铣削加工过程刚开始时,刀具在工件表面上并没有进行切削,而仅仅是产生滑擦和耕犁,然后随着加工继续进行会产生少量带状切屑,最后产生大量稳定切屑,其加工过程仿真结果如图 4 所示.从微尺度铣削加工仿真的应力云图中可以看出微尺度铣削加工时工件表面的应力分布情况,从图 4 中可以看出,刀具在工件表面上滑擦和耕犁过程的应力相对较大,当产生大量稳定切屑时,切削过程相对稳定,此时的应力相对较小且均匀.

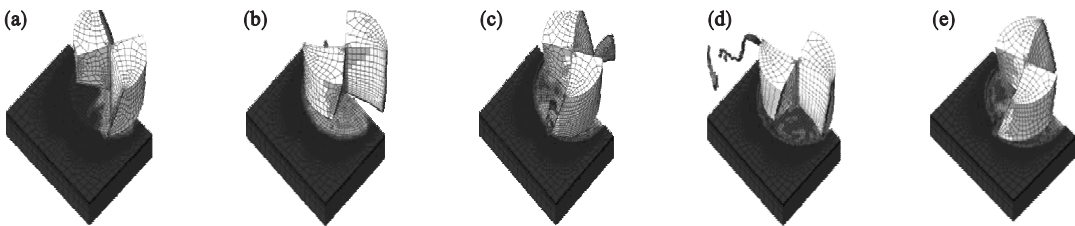


图 4 微尺度铣削加工过程仿真
Fig. 4 Simulation of the micro-milling machining process
(a)—开始阶段; (b)—滑擦和耕犁阶段; (c)—切削阶段; (d)—成屑阶段; (e)—稳定阶段.

铣削速度对铝合金 6061 铣削力(合力)的影响仿真结果如图 5 所示,此时铣削速度为 1 130.4 mm/s,铣削深度为 10 μm.仿真中铝合金 6061 不同铣削速度下的铣削力(合力)有效值的变化情况如图 6 所示.从图 6 中可以看出,随着铣削速度的不断增大,铣削力先增大后减小,转折点为 1 130.4 mm/s.当加工过程的铣削速度较小时,刀具在工件表面上并没有进行切削,而仅仅是产生滑擦和耕犁,此时工件对刀具的作用力较大,使得铣削力增大,当铣削速度不断增大时,刀具正式进入切削状态,又使得铣削力减小.

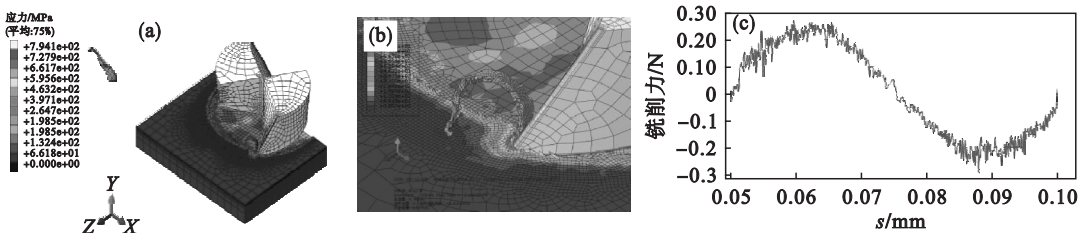


图 5 铣削速度对铣削力的影响有限元仿真结果
Fig. 5 Finite element simulation results of the influence of milling speed on milling force
(a)—整体应力云图; (b)—切削部位应力云图; (c)—铣削力随位移变化曲线.

1.4 不同铣削深度下的仿真与结果分析

仿真采用后文实验中的工艺参数,铣削深度

分别为 5, 8, 10, 12, 15 μm, 铣削速度恒定为 1 130.4 mm/s, 对铝合金 6061 加工过程中的铣削

力进行仿真研究,探究铣削深度对铣削力(合力)的影响.

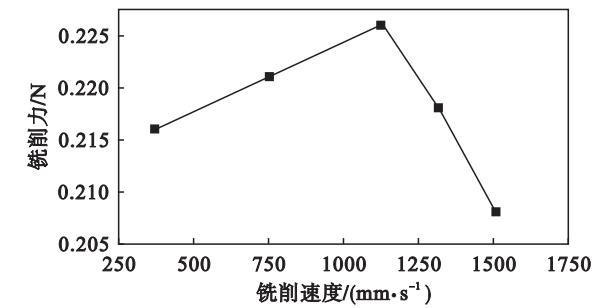


图 6 铣削速度对铣削力的影响
Fig. 6 Influence of milling speed on milling force

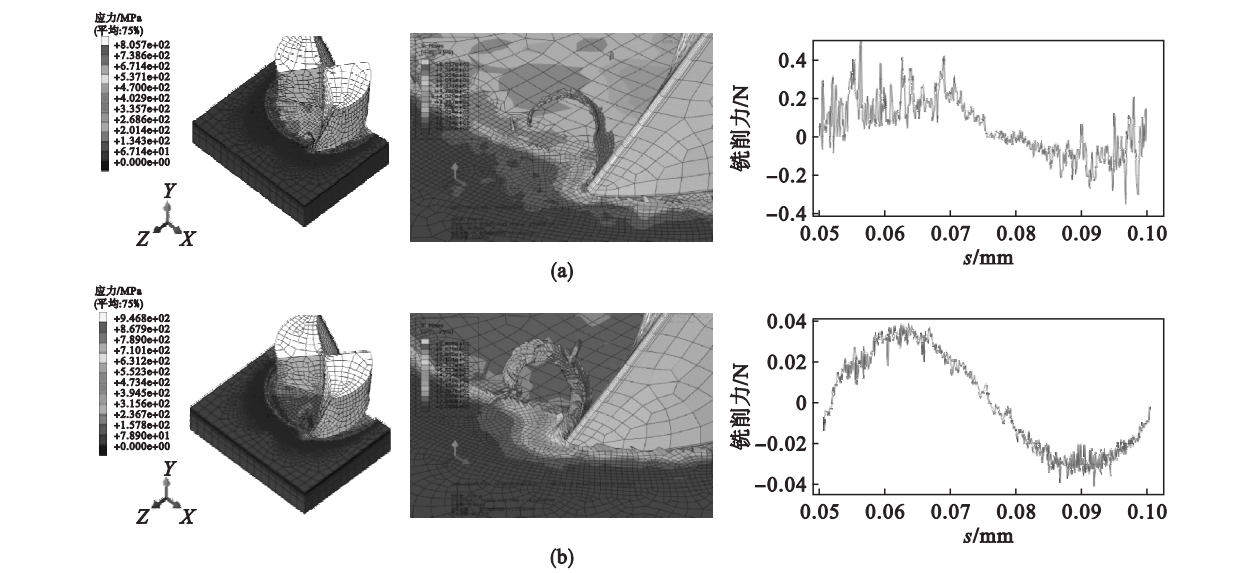


图 7 铣削深度对铣削力的影响有限元仿真结果
Fig. 7 Finite element simulation results of the influence of milling depth on milling force
(a)—铣削深度 5 μm , 铣削速度 1 130.4 mm/s; (b)—铣削深度 15 μm , 铣削速度 1 130.4 mm/s.

仿真中铝合金 6061 不同铣削深度下的铣削力(合力)有效值的变化情况如图 8 所示.从图 8 中可以看出,随着铣削深度的不断增大,铣削力也逐渐增大,但其增长速度有所不同.随着铣削深度的不断增大,铣削表面的塑性变形也不断增大,使得铣削力逐渐增大.

2 微尺度铣削的铣削力实验研究

2.1 实验条件及方案

实验的加工设备采用巨蟹精密加工机床,其可实现 60 000 r/min 的主轴转速,9 m/min 的切削进给速度以及 0.002 mm 的对刀精度,工作空间的尺寸为 490 mm \times 460 mm \times 120 mm,其加工精度能达到亚微米级;检测设备采用 VHX - 1000E 超景深显微镜和 Micromeasure 三维轮廓仪以及 DH - 5920N 动态信号测试分析仪;实验刀具采用

仿真中,铣削深度通过建模过程中预先设定好的切削层厚度来改变,需要在工件三维模型中预先建立厚度分别为 5,8,10,12,15 μm 的切削层,并将其堆积到工件三维模型的顶端来进行微尺度铣削仿真.

铣削深度对铝合金 6061 铣削力(合力)的影响仿真结果如图 7 所示.从图 7 中可以看出,微尺度铣削加工过程中,已加工表面的应力分布比较均匀,其中微铣刀与工件接触部位的应力最大,铣削力随位移的变化曲线近似为正弦曲线且呈周期性变化,但不同铣削深度下的铣削力(合力)的波动情况有所不同.

直径为 0.6 mm 的 M. A. FORD 双刃硬质合金微铣刀;实验材料采用在航空航天和国防等领域应用广泛的铝合金 6061.

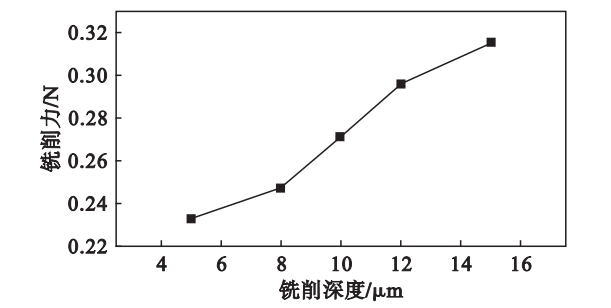


图 8 铣削深度对铣削力的影响
Fig. 8 Influence of milling depth on milling force

本文采用单因素槽铣削实验的方法,分别探究铝合金 6061 微尺度铣削时主轴转速、铣削深度和进给速度对铣削力(合力)的影响.以下三组实验分别进行(每组实验进行 3 次并取平均值):

①主轴转速分别为 12 000,24 000,36 000,42 000,48 000 r/min(分别对应仿真中的铣削速度 376.8,753.6,1 130.4,1 318.8,1 507.2 mm/s),铣削深度恒定为 10 μm ,进给速度恒定为 40 $\mu\text{m/s}$;②主轴转速恒定为 36 000 r/min,铣削深度分别为 5,8,10,12,15 μm ,进给速度恒定为 40 $\mu\text{m/s}$;③主轴转速恒定为 36 000 r/min,铣削深度恒定为 10 μm ,进给速度分别为 20,40,60,80,100 $\mu\text{m/s}$.

通过 DH-5920N 动态信号测试分析仪分别测出每组实验中 X,Y,Z 方向的铣削力,并将这 3 个方向的分力合成为合力进行研究.

2.2 实验结果及分析

通过主轴转速、铣削深度和进给速度单因素实验,得到各铣削参数对铣削力(合力)的影响规律,如图 9 所示.

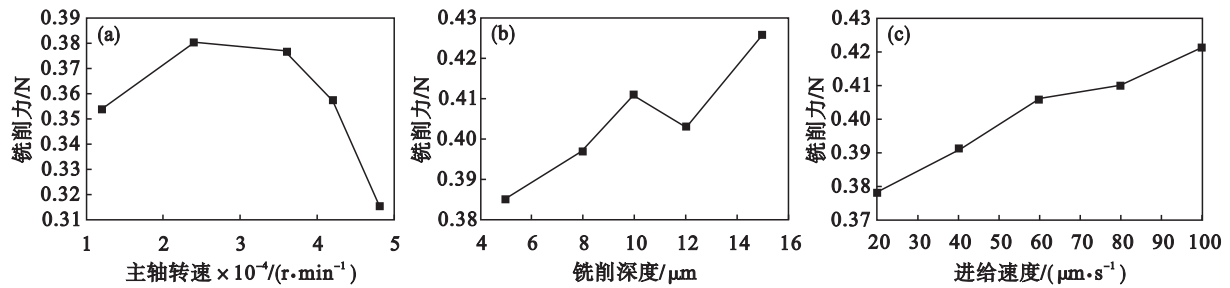


图 9 各因素对铣削力的影响
Fig. 9 Influence of each factor on milling force

(a)—主轴转速对铣削力的影响;(b)—铣削深度对铣削力的影响;(c)—进给速度对铣削力的影响.

从图 9a 可以看出,随着主轴转速的不断增大,铣削力先增大后减小,转折点为 24 000 r/min,变化趋势与仿真结果基本一致.当主轴转速较小时,刀具在工件表面上没有进行切削,而只进行滑擦和耕犁过程,导致此时的铣削力较大;在其他工艺参数不变的情况下,随着主轴转速的继续提高,切屑与微铣刀前刀面的接触处会局部熔化并形成一层液态薄膜,可以有效减小微铣刀前刀面的平均摩擦因数,使得微铣刀前刀面的变形系数减小,切屑变形时间缩短,切屑在被切离工件的瞬间带走大部分切削热,铝合金 6061 材料的塑性变形量减小,这样就大大减小了铣削力.

从图 9b 可以看出,随着铣削深度的不断增大,铣削力先增大后减小再增大,转折点为 10 μm 和 12 μm ,变化趋势总体上与仿真结果一致.当铣

削深度不断增大时,铣削表面的塑性变形不断增大,铣削力也不断增大;当铣削深度继续增大时,刀具摆脱最小切削厚度效应的影响,并进入稳定切削状态,铣削力随之减小;当铣削深度继续增大时,微尺度铣削加工过程的切削阻力不断增大,切屑很难被切离工件,这样使得加工过程消耗大量能量,导致铣削力又增大.

从图 9c 可以看出,随着进给速度的不断增大,铣削力也不断增大.进给速度越大,切削效率越高,但铣削力也显著增大,可能导致微铣刀来不及排出切屑,造成切屑黏附在微铣刀的切削刃上,使得加工后的铝合金 6061 工件表面质量变差.图 10 为铝合金 6061 材料在主轴转速 36 000 r/min,铣削深度 10 μm 时不同进给速度下的表面形貌.从图 10 中可以看出,进给速度越大,其表面质量越差.

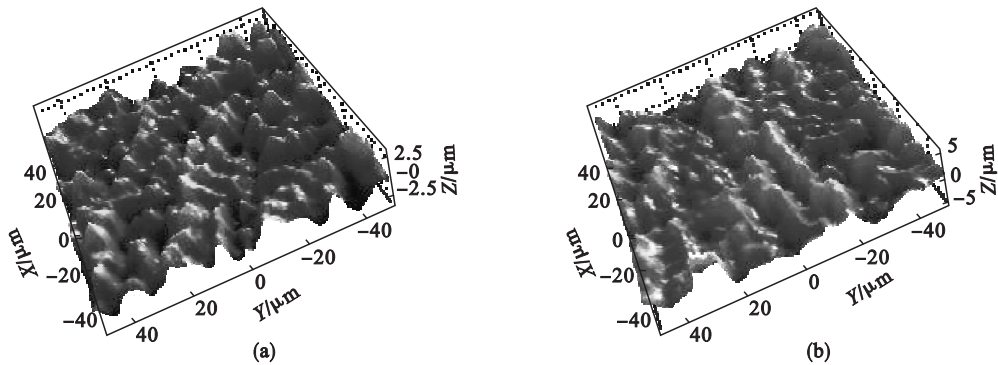


图 10 铝合金 6061 材料不同进给速度下的表面形貌
Fig. 10 Surface morphology of aluminum alloy 6061 material at different feed rates
(a)—进给速度 40 $\mu\text{m/s}$; (b)—进给速度 80 $\mu\text{m/s}$.

2.3 微尺度铣削工艺参数的优选

根据铝合金 6061 材料主轴转速、铣削深度和进给速度的铣削力单因素实验,铝合金 6061 材料微尺度铣削实验参数范围内最优工艺参数组合为主轴转速 48 000 r/min,铣削深度5 μm,进给速度 20 μm/s. 此时的铣削力最小,微尺度铣削加工效果最好.

3 结 论

1) 通过 ABAQUS 有限元仿真,模拟出了铝合金 6061 材料的微尺度铣削过程. 结果表明,随着铣削速度的不断增大,铣削力先增大后减小,转折点为 1 130. 4 mm/s;随着铣削深度的不断增大,铣削力也逐渐增大.

2) 铝合金 6061 材料主轴转速、铣削深度和进给速度的铣削力单因素实验结果表明,随着主轴转速的不断增大,铣削力先增大后减小,转折点为 24 000 r/min,变化趋势与仿真结果基本一致;随着铣削深度的不断增大,铣削力先增大后减小再增大,转折点为 10 μm 和 12 μm,变化趋势总体上与仿真结果一致;随着进给速度的不断增大,铣削力也不断增大.

3) 铝合金 6061 材料微尺度铣削实验参数范围内最优工艺参数组合为主轴转速48 000 r/min,铣削深度 5 μm,进给速度20 μm/s.

4) 仿真结果中的铣削力变化趋势与实验结果基本一致,但实验测得的铣削力明显大于仿真得到的铣削力,这与实验加工中机床的振动有关.

参考文献:

[1] 王慧. 微铣削加工技术的发展现状[J]. 淮南职业技术学院学报,2010,10(2):57-59.
(Wang Hui. Recent advances in micro-milling technology [J]. *Journal of Huainan Vocational & Technical College*, 2010,10(2):57-59.)

[2] 包杰,李亮,何宁,等. 国外微细铣削研究综述[J]. 机械科学与技术,2009,28(8):1018-1022.
(Bao Jie,Li Liang,He Ning,et al. A brief review of micro-milling technology [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*,2009,28(8):1018-1022.)

[3] 蔡明,巩亚东,于宁,等. 单晶 DD98 微尺度铣削表面质量试验研究[J]. 中国机械工程,2017,28(11):1261-1265.
(Cai Ming,Gong Ya-dong,Yu Ning,et al. Experimental study on surface quality of single crystal DD98 in micro-milling processes [J]. *China Mechanical Engineering*,2017,28(11):1261-1265.)

[4] Adams D P,Vasilem J,Benavides G,et al. Micromilling of metal alloy with focused ion beam-fabricated tool [J]. *Precision Engineering*,2001,25(2):107-113.

[5] Zhu L D,Li H N,Wang W S. Research on rotary surface topography by orthogonal turn-milling [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2013,69(1/2/3/4):2279-2292.

[6] Ding H,Ibrahim R,Cheng K,et al. Experimental study on machinability improvement of hardened tool steel using two dimensional vibration-assisted micro-end-milling [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*,2010,50(12):1115-1118.

[7] Dornfeld D,Takeuchi Y. Recent advances in mechanical micro machining [J]. *Annals of the CIRP*,2006,55(2):746-748.

[8] Son S M,Lim H S,Ahn J H. Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*,2005,45(4):529-535.