

微细铣削毛刺宽度仿真与试验研究

孙秋莲,程祥,郑光明,田业冰,王飞

山东理工大学

摘要: 作为一种重要的微小型精密零件加工工艺,微细铣削在铣削过程中产生的毛刺严重影响其加工质量及加工效率。为有效减小微细铣削过程中的毛刺尺寸,运用有限元分析软件 DEFORM 对微细铣削不锈钢材料的关键因素(轴向切深、每齿进给量、主轴转速及径向切深)进行有限元分析,得出了毛刺尺寸最小的优化铣削参数,并通过微细铣削试验验证了有限元分析结果的正确性及合理性,说明有限元仿真可以有效指导铣削试验,从而降低试验成本,提高试验效率。

关键词: 微细铣削;毛刺;铣削力;有限元仿真

中图分类号: TG547;TH162;TP391.9

文献标志码: A

Simulation and Experiment Investigation of Burr Width in Micro Milling

Sun Qiulian, Cheng Xiang, Zheng Guangming, Tian Yebing, Wang Fei

Abstract: The micro milling is an important process for machining miniaturized parts, but the burrs generated in process can seriously affect the machining quality and efficiency. In order to reduce the burr size, the key milling parameters such as axial depth of cut, feed engagement, spindle speed and radial depth of cut are firstly studied by the finite element simulation software DEFORM to get the optimal parameters for the minimal burr size in micro milling stainless steel. Then, the micro milling experiment is carried out, the correctness and rationality of the simulation results are authenticated. The simulation method can effectively guide the actual experimental machining, so as to decrease the experiment cost and enhance the efficiency.

Keywords: micro milling; burr; milling force; finite element simulation

1 引言

随着航空航天、国防工业和生物医疗的快速发展,对高精密微型零件的需求越来越大。微细铣削是加工微型零件的重要方法,能够加工形状复杂的三维微小型零件,而加工过程中产生的毛刺是影响加工效率及加工质量的重要因素。因此,有效减小或抑制加工过程中的毛刺产生,对微细铣削加工具有重要的意义。

为了更好地抑制或减小毛刺尺寸,很多学者对毛刺的形成机理、铣削参数及加工工艺做了广泛研究。Mark J. 等^[1]通过研究刀尖周围的应力场、工件的位错密度、槽切入端口等因素对毛刺尺寸的影响规律,发现涂层刀具能够有效防止刀尖周围压应力面积的扩大,从而有效抑制毛刺的形成,高位错密度的工件不容易形成毛刺,铣削端口能够有效抑制切入毛刺的形成;张志阳等^[2]研究了切削速度、进给速度、轴向切深和微铣刀刃圆半径对微槽毛刺形成

及变化的影响规律,并借助统计分析方法揭示了铣削参数对毛刺尺寸影响程度的主次顺序,得到了能够使毛刺尺寸最小化的最优参数组合;Ding H. 等^[3]研究尺度效应对槽顶部毛刺的影响,发现每齿进给量对槽顶的毛刺高度有显著影响,在微端铣削中使用振动辅助切割可有效减小尺寸效应,提高切削性能,从而降低顶部毛刺的高度;Zhang T. 等^[4]研究了尺度效应对微细切削过程中毛刺形成的影响结果,发现切削厚度与刃圆半径的比值对泊松毛刺高度有重要影响,比值增大(增加切削厚度或者减小刃圆半径)会使毛刺高度减小,当比值为 1 时,出口毛刺高度值可以实现最小;Aramcharoen A. 等^[5]分析了微细铣削加工中最小切削厚度对切削比能、表面加工质量及毛刺形成的影响,发现随着切削厚度与切削刃圆半径比值的减小,毛刺尺寸明显增大;Kienzler A. 等^[6]采用微细铣削、磨料微喷砂、超声波微喷砂对毛刺最小化及毛刺去除进行试验研究,发现超声波微喷砂在三种减小毛刺尺寸工艺中效果最好。该工艺不会使喷砂工件材料产生塑性变形,不仅能有效减小槽顶的毛刺尺寸,还可以有效修补工件表面的铣削痕迹。尽管众多学者为减小毛刺尺寸或抑

制毛刺产生做了大量相关研究,但在成本较高的切削试验中很难对毛刺形成过程参数如切削热、毛刺变形过程等进行动态观察。为了更好地研究减小毛刺尺寸的规律同时又节约加工试验成本,本文运用有限元仿真软件对影响毛刺尺寸的关键因素进行仿真,并采用切削试验方法对仿真结果进行验证。

2 单因素有限元仿真试验

2.1 仿真设计

(1) 材料模型

运用三维有限元仿真软件 DEFORM 3D 对 304 不锈钢槽顶毛刺进行切削仿真。仿真采用 Johnson-Cook(J-C)本构模型,该模型形式简单,适合于各种晶体结构材料,被广泛应用于切削加工中^[7,8]。Johnson-Cook(J-C)本构模型可表示为

$$\bar{\delta} = [A + B(\bar{\epsilon})^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\bar{\epsilon}}{\epsilon_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m \right] \quad (1)$$

式中, $A + B(\bar{\epsilon})^n$ 为应变率效应; $1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m$ 为热软化效应; $\bar{\delta}$ 为材料流动应力; $\bar{\epsilon}$ 、 ϵ_0 为材料应变率; T 为材料发生变形时的温度; T_{melt} 和 T_{room} 分别为材料熔点和室温; A 为材料屈服应力; B 为应变硬化常数; C 为应变率系数。304 不锈钢 Johnson-Cook(J-C)模型参数见表 1。

表 1 304 不锈钢 Johnson-Cook(J-C)模型参数^[9]

A(MPa)	B(MPa)	C	n	$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	$T_{room}(\text{℃})$	E(GPa)
310	1000	0.07	0.65	7800	20	200

(2) 仿真模型

使用 SolidWorks 软件建立直径为 1mm 的双刃铣刀模型及工件模型,然后将刀具及工件模型导入 DEFORM 3D 软件中。在保证仿真精度的前提下,为了提高仿真效率,对刀具及工件模型进行简化处理,如图 1 所示。

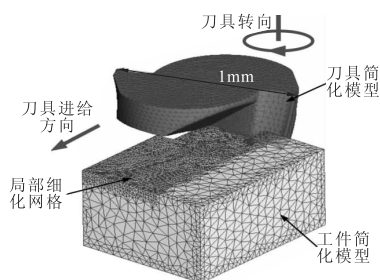


图 1 仿真模型

为了确保工件与刀具参与铣削部分的仿真精度,对刀具前刀刃、后刀刃及工件参与铣削部分的模型做局部网格细化处理。

(3) 仿真参数

为探究关键铣削参数对槽顶毛刺尺寸的影响规律,基于以往试验研究所得的试验数据^[10],选取仿真铣削参数(见表 2)完成有限元仿真边界条件(如选择工件底面为固定面、工件侧面为温度交换面等)相关设置后,进行仿真铣削试验研究。

表 2 有限元仿真参数

组	不变参数	可变参数
1	$a_c = 1000\mu\text{m}$ $f_z = 2\mu\text{m}/\text{z}$ $n = 60000\text{r}/\text{min}$	$a_p(\mu\text{m}) = 10, 20, 30, 40, 80, 120$
2	$a_c = 1000\mu\text{m}$ $a_p = 100\mu\text{m}$ $n = 60000\text{r}/\text{min}$	$f_z(\mu\text{m}/\text{z}) = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3$
3	$a_c = 1000\mu\text{m}$ $a_p = 100\mu\text{m}$ $f_z = 2\mu\text{m}/\text{z}$	$n(10000\text{r}/\text{min}) = 3, 4, 5, 6, 6.5$
4	$a_p = 100\mu\text{m}$ $f_z = 2\mu\text{m}/\text{z}$ $n = 60000\text{r}/\text{min}$	$a_c(\mu\text{m}) = 100, 200, 400, 600, 800, 1000$

2.2 仿真结果

对四组试验进行有限元仿真,第二组试验结果如图 2 所示。由图可知,毛刺宽度随着每齿进给量的增大呈现先降低后增大的趋势。当每齿进给量 $< 1.5\mu\text{m}/\text{z}$ 时,毛刺宽度随每齿进给量的增大呈递减的趋势,如图 2a - 图 2c 所示;当每齿进给量 $> 1.5\mu\text{m}/\text{z}$ 时,毛刺宽度随每齿进给量的增大呈递增的趋势,如图 2d - 图 2f 所示。毛刺尺寸随每齿进给量的变化趋势与微细铣削中存在的尺寸效应有关^[11]。

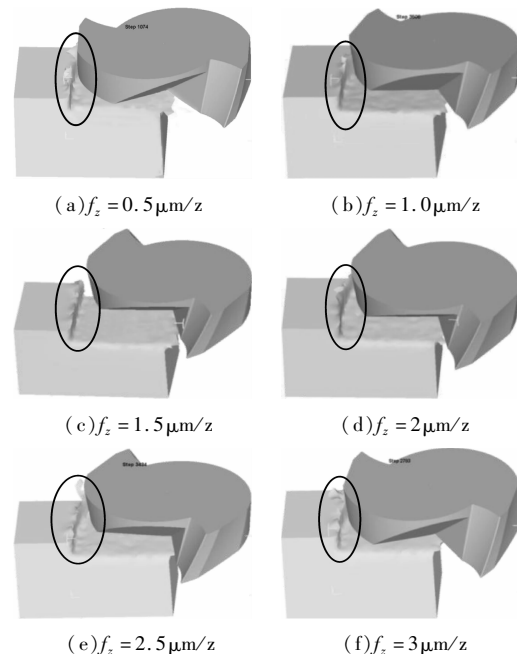


图 2 仿真毛刺形貌

2.3 仿真结果分析

为确保毛刺宽度计算的准确性,对槽顶端 20 个不同位置的毛刺进行测量并求和取平均值。毛刺宽度计算式为

$$B_w = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} \Delta w_i \quad (2)$$

式中, B_w 为毛刺平均宽度; W_i 为第 i 个测量位置的毛刺宽度值。

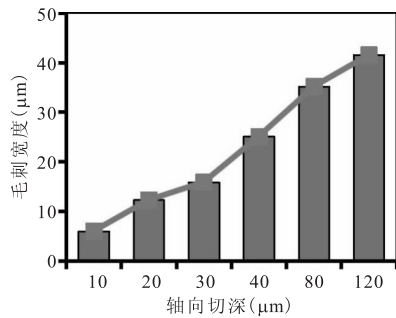
仿真铣削力为每个沟槽仿真时间段内铣削力的有效值求和并取平均值, 铣削力计算式为

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (3)$$

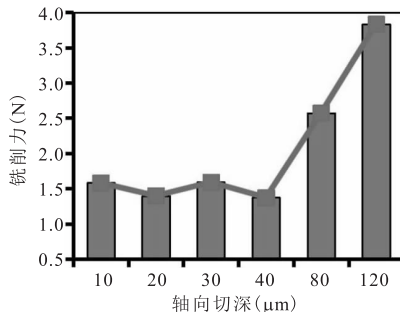
式中, F 为铣削力; F_x 、 F_y 、 F_z 分别为 X 、 Y 、 Z 方向分力。

(1) 轴向切深

有限元仿真中轴向切深与毛刺宽度的变化关系如图 3a 所示, 由图可见, 毛刺宽度随轴向切深的增大而呈现波动上升的趋势。铣削力随轴向切深的变化关系如图 3b 所示, 由图可见, 当轴向切深 $< 40 \mu\text{m}$ 时, 铣削力随轴向切深的增大而呈现递减趋势, 这是因为微细铣削中存在尺度效应使铣削力呈现非线性增长; 当轴向切深 $> 40 \mu\text{m}$ 时, 铣削力随轴向切深的增大而呈现递增趋势, 这是因为轴向切深越大, 刀具在单位时间内切削材料体积增大, 刀具切断材料所需要的切削阻力增大, 因此铣削力随着轴向切深的增大而增大。因此, 当轴向切深为 $40 \mu\text{m}$ 左右时, 获得的毛刺宽度尺寸最小。



(a) 轴向切深与毛刺宽度

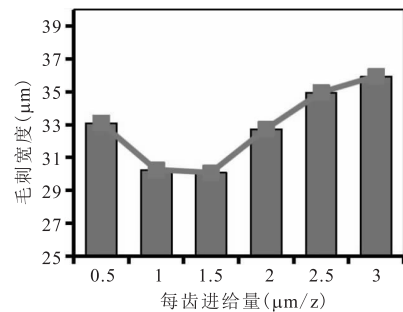


(b) 轴向切深与铣削力

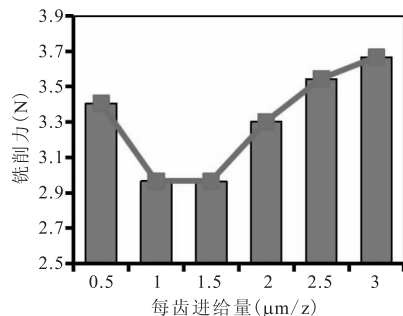
图3 轴向切深与毛刺宽度、铣削力关系曲线

(2) 每齿进给量

有限元仿真中每齿进给量与毛刺宽度、铣削力的变化趋势如图 4 所示。由图可见, 当每齿进给量 $< 1.5 \mu\text{m}/\text{z}$ 时, 随着每齿进给量的增大, 毛刺宽度及铣削力均呈递减趋势。由文献[12]可知, 毛刺宽度及铣削力呈现非线性增加趋势与尺寸效应的影响有关。当每齿进给量 $> 1.5 \mu\text{m}/\text{z}$ 时, 随着每齿进给量的增加, 毛刺宽度及铣削力均呈递增趋势, 这是由于随着每齿进给量的增大, 刀具在单位时间内切削材料体积增大, 从而使得毛刺尺寸增大。由图 4 可知, 当每齿进给量为 $1.5 \mu\text{m}$ 左右时, 获得的毛刺宽度尺寸最小。



(a) 每齿进给量与毛刺宽度

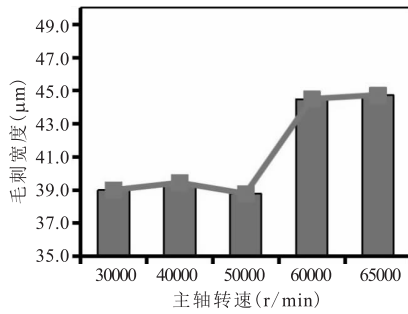


(b) 每齿进给量与铣削力

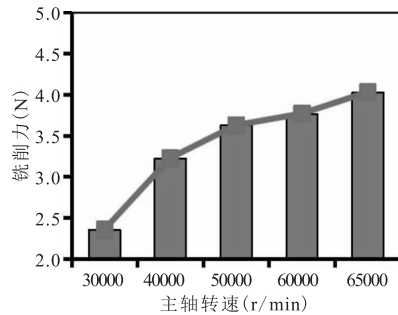
图4 每齿进给量与毛刺宽度、铣削力关系曲线

(3) 主轴转速

有限元仿真中的主轴转速与毛刺宽度、铣削力的变化关系见图 5。可见, 随着主轴转速的增大, 毛刺宽度及铣削力均呈整体波动上升的趋势, 这是因为主轴转速的增加导致切削温度升高, 不锈钢材料线膨胀系数大而易发生塑性变形或切削瘤, 导致铣削时切屑不易断裂, 在微沟槽顶部易产生宽度较大的毛刺。当主轴转速 $\leq 50000 \text{r}/\text{min}$ 时, 毛刺宽度随主轴转速的增大而呈先增大后减小的趋势; 当主轴转速 $> 50000 \text{r}/\text{min}$ 时, 毛刺宽度随着主轴转速的增大而呈递增趋势。因此, 当主轴转速为 $50000 \text{r}/\text{min}$ 时, 有限元仿真试验中的毛刺宽度较小。



(a) 主轴转速与毛刺宽度

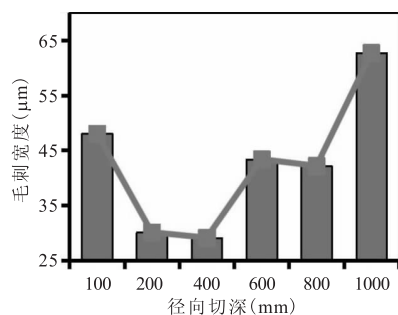


(b) 主轴转速与铣削力

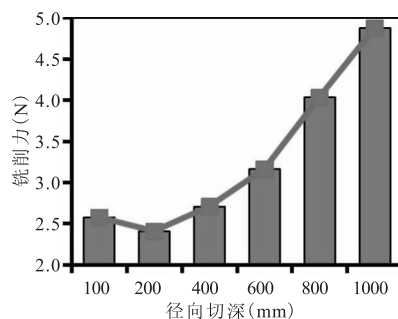
图5 主轴转速与毛刺宽度、铣削力关系曲线

(4) 径向切深

有限元仿真中径向切深与毛刺宽度的变化趋势如图 6a 所示。有限元仿真中径向切深与铣削力的关系如图 6b 所示。



(a) 径向切深与毛刺宽度



(b) 径向切深与铣削力

图6 径向切深与毛刺宽度、铣削力关系曲线

从图 6a 可以看出,毛刺宽度随着径向切深的增大呈先降低后增大的趋势。当径向切深 $< 200\mu\text{m} - 400\mu\text{m}$ 时,毛刺宽度随着径向切深的增大而降低,

这与微细铣削中的最小未变形切屑厚度有关^[13];当径向切深大于 $200\mu\text{m} - 400\mu\text{m}$ 时,随着径向切深的增大,毛刺宽度呈现递增趋势,这是由于随着径向切深的增大,刀具单位时间内切下材料的体积增大,刀具与工件间的接触面积增大,从而使毛刺宽度增大。从图 6b 可知:随着径向切深的增大,毛刺宽度呈现波动上升的趋势;当径向切深为 $200\mu\text{m}$ 时,铣削力最小。

3 试验验证

通过有限元分析获得最小槽顶的毛刺尺寸优化铣削参数为轴向切深 $40\mu\text{m}$ 、每齿进给量 $1.5\mu\text{m}/z$ 、主轴转速 $50000\text{r}/\text{min}$ 、径向切深 $200\mu\text{m}$ 。为了探究仿真试验结果的合理性,采用有限元分析获得的优化铣削参数及非优化铣削参数分别铣削沟槽。

(1) 试验设备

试验加工设备采用三轴微细铣削数控机床 3A-S100,其主轴径向跳动和轴向窜动均在 $1\mu\text{m}$ 以内,电主轴最高转速为 $80000\text{r}/\text{min}$,如图 7 所示。试验加工刀具与仿真一致,均采用直径为 1mm 的双刃硬质合金刀具。工件沟槽加工完成后用扫描电镜 (SEM) 观测毛刺形貌尺寸,并分析处理获得的试验毛刺宽度。

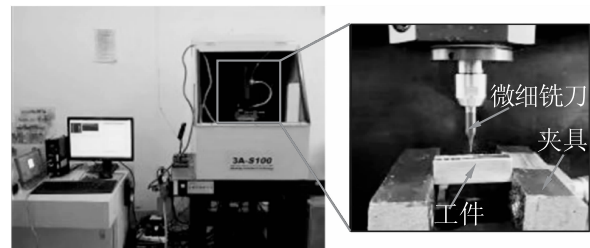


图7 试验加工设备

(2) 试验结果分析

试验采用有限元分析得到的铣削参数进行 3 个微沟槽加工,并利用 SEM 测量沟槽,如图 8a - 图 8c 所示。为对比说明铣削参数的合理性,基于表 1 试验数据,选取铣削参数 $a_e = 1000\mu\text{m}$ 、 $f_z = 2\mu\text{m}/z$ 、 $n = 60000\text{r}/\text{min}$ 、 $a_p = 100\mu\text{m}$ 再进行一个沟槽的铣削,试验结果如图 8d 所示。通过对比可以看出,图 8a - 图 8c 的毛刺尺寸明显变小,且微沟槽表面质量较好。经过计算得到前三个沟槽毛刺平均宽度为 $213.79\mu\text{m}$,后一个沟槽毛刺平均宽度为 $362.37\mu\text{m}$,从而验证了有限元分析试验结果的正确性及合理性,并说明了采用有限元仿真结果可以有效指导实际铣削试验加工。

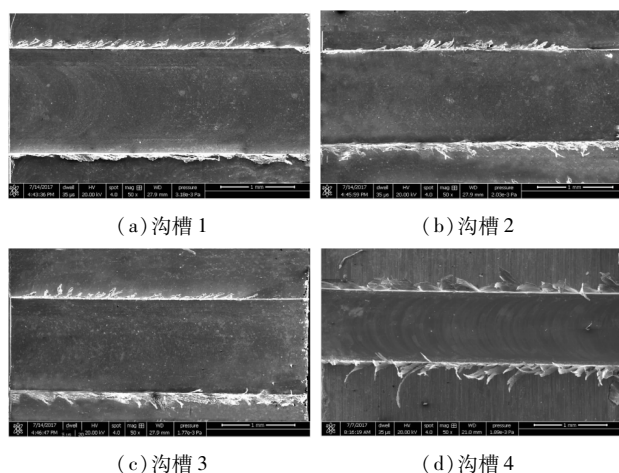


图8 切削试验加工出的微沟槽

4 结语

针对影响毛刺尺寸大小的微细铣削关键影响因素(主轴转速 n 、轴向切深 a_p 、每齿进给量 f_z 及径向切深 a_e)进行有限元仿真分析及切削试验验证,得出以下结论:

(1)通过有限元仿真铣削不锈钢工件微沟槽可知,当轴向切深 $a_p = 45\mu\text{m}$ 、每齿进给量 $f_z = 1.5\mu\text{m}/z$ 、径向切深 $a_e = 200\mu\text{m}$ 、主轴转速 $n = 48000\text{r}/\text{min}$ 时,槽顶毛刺宽度最小;

(2)通过微细铣削试验可知,利用有限元分析获得的优化参数铣削三个沟槽的平均毛刺宽度为 $213.79\mu\text{m}$,不采用优化参数铣削沟槽的毛刺宽度为 $362.37\mu\text{m}$ 。由此可以看出,优化参数加工的毛刺尺寸明显减小,从而验证了有限元分析结果的正确性及合理性,并说明了采用有限元仿真结果可以有效指导实际铣削试验加工。

参考文献

- [1] Mark J, Jackson, Grant M, et al. Whit field burr formation and elimination in micro milling processes [J]. International Journal of Nano Manufacturing, 2007: 458 - 467.
- [2] 张志阳, 裴宏杰, 沈春根, 等. Al7075 铝合金微细铣削毛刺形成及控制技术研究[J]. 工具技术, 2017(11): 21 - 25.
- [3] Ding H, Chen S J, Ibrahim R, et al. Investigation of the size effect on burr formation in two dimensional vibration assisted micro end milling [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(11): 2032 - 2039.
- [4] Zhang T, Liu Z Q, Xu C H. Influence of size effect on burr

formation in micro cutting [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 170: 4801 - 4808.

- [5] Aramcharoen A, Mativenga P T. Size effect and tool geometry in micro milling of tool steel [J]. Precision Engineering, 2009(33): 402 - 407.
 - [6] Kienzler A, Deuchert M, V Schulze. Burr minimization and removal by micro milling strategies or micro peening processes [C]. Burrs-Analysis, Control and Removal, 2010: 237 - 243.
 - [7] Hou Q Y, Wang J T. A modified Johnson-Cook constitutive model for Mg-Gd-Y alloy extended to a wide range of temperatures [J]. Computational Materials Science, 2010, 50(1): 147 - 152.
 - [8] Umbrello D, M'Saoubi R, Outeiro J C. The influence of Johnson-Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(3): 462 - 470.
 - [9] Dean J, S Fallah A, Brown P M, et al. Energy absorption during projectile perforation of light weight sandwich panels with metallic fiber cores [J]. Composite Structures, 2011, 93(3): 1089 - 1095.
 - [10] Sun Qiulian, Cheng Xiang, Yang Xianhai, et al. Modeling and simulation for micro milling mechanisms [J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 760 - 766.
 - [11] Mian A J, Driver N, Mativenga P T. Identification of factors that dominate size effect in micro - machining [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(5): 383 - 394.
 - [12] 曹自洋, 何宁, 李亮. 刀具切削刃钝圆对微细切削加工尺寸效应影响的有限元模拟研究 [J]. 机械科学与技术, 2009, 28(2): 186 - 190.
 - [13] Cheng X, Wei X T, Yang X H, et al. Unified criterion for brittle ductile transition in mechanical micro cutting of brittle materials [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2014, 136: 051013.
- 第一作者: 孙秋莲, 硕士研究生, 山东理工大学机械工程学院, 255049 山东省淄博市
- First Author: Sun Qiulian, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shangdong 255049, China
- 通信作者: 程祥, 副教授, 山东理工大学机械工程学院, 255049 山东省淄博市
- Corresponding Author: Cheng Xiang, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shangdong 255049, China