

微细铣削力对毛刺尺寸的影响规律研究

孙秋莲¹,程祥²,杨先海³,郑光明³,刘原勇³,赵国勇³

山东理工大学

摘要: 毛刺是影响微细铣削质量和效率的关键因素之一,本文运用有限元仿真与微细铣削试验相结合的方法研究了微细铣削中轴向力与径向力对毛刺宽度的影响,并以毛刺宽度为试验指标获得轴向力与径向力对毛刺宽度的影响规律。结果表明:当微细铣削参数大于临界未变形切屑厚度时,毛刺宽度随轴向切深、每齿进给量的增大而增大;当微细铣削参数小于临界未变形切屑厚度时,毛刺宽度随轴向切深、每齿进给量的增大先增大后减小,轴向力、径向力随轴向切深、每齿进给量的增大先增大后减小。总的来讲,毛刺宽度总体趋势随着轴向力、径向力的增大而增大,在后续的微细铣削参数优化中可以将切削力作为优化指标,间接地降低毛刺尺寸。

关键词: 微细铣削;毛刺;切削力;有限元分析

中图分类号: TG547;TH161

文献标志码: A

Influence Regularity of Micro Milling Force on Burr Size

Sun Qiulian, Cheng Xiang, Yang Xianhai, Zheng Guangming, Liu Yuanyong, Zhao Guoyong

Abstract: The burrs has become one of the key factors of micromilling quality and efficiency. This paper studies the effect of axial force and radial force on burr width with the combination of finite element method and micromilling experiment. Burr width is selected as the experimental index to obtain influence rule of axial force and radial force on the burr width in micromilling. The result shows that the burr width increases with the increasement of axial depth of cut and feed engagement when the milling parameters is bigger than the critical undeformed chip thickness. When the milling parameters is smaller than the critical undeformed chip thickness, the burr width increases at first and then decreases with the increasement of axial depth of cut and the feed engagement. Meanwhile, axial force and radial force increase at first and then decrease with the increasement of axial depth of cut and the feed engagement. Conclusively, the burr width has a total trend to increase with the increasement of axial force and radial force. Therefore, the milling force can be regarded as the optimize index to realize the reduction of burr size indirectly in subsequent micromilling parameter optimization.

Keywords: micromilling; burr; cutting force; finite element method

1 引言

随着科学技术的迅速发展,工业制造、航空航天、医疗器材和信息通信等领域对小型化零件的需求日益增多^[1],且加工精度及表面质量要求越来越高。微细铣削加工技术具有加工效率高、可加工材料多样化且能够实现从简单二维到复杂三维曲面微小零件等加工特点^[2],成为具有复杂三维几何特征微小型零件制造的重要技术之一。然而微细铣削加工过程中的毛刺成为影响工件的加工质量和加工效率的重要因素,尤其是在零件的顶端、侧边、棱边等部位。通过研究毛刺的影响因素不仅能提高微型零件的加工质量和加工效率,还能提高工件的使用性能,对微型零件的生产制造具有重要意义。

目前国内外学者对微细铣削过程中毛刺的参数、加工工艺、形成机理等进行了广泛的研究。Vivek Bajpai 等^[3]通过对铝 Ti6Al4V 进行槽铣削试验,研究了主轴转速、进给速率、切削深度以及刀具直径等工艺参数对毛刺尺寸的影响,发现毛刺宽度随主轴转速及进给速度的提高而降低,随切削深度的提高而增大,刀具直径对毛刺尺寸影响不明显;G. Kiswanto 等^[4]通过试验研究了微细铣削加工过程中不同切削参数对毛刺形成的影响作用,发现切削参数选择和实际的工具条件对毛刺产生有重要影响;倪海波^[5]研究刀具前角、刀具刃口半径、铣削深度、进给量和主轴转速等对毛刺的影响,并通过试验验证了仿真中切削参数对毛刺的影响规律;曹自洋等^[6]选取典型微三维零件特征进行铣削特性试验,对加工过程中产生的微细毛刺进行观察与分析,研究微铣削毛刺的形成及影响因素。

综上所述,国内外学者对微细铣削过程中毛刺

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2015EL023);山东省重点研发计划项目(2016GGX103015)

收稿日期: 2017年8月

形成及抑制做了广泛研究,但在微细铣削中关于刀具轴向力和径向力对毛刺产生影响规律的研究却很少。因此,本文通过有限元建模仿真分析与试验相结合的方法,研究微细铣削力对毛刺尺度的影响规律,为高精密微小零件切削提供指导。

2 仿真试验过程

2.1 试验方案设计

为了更好地研究微细铣削过程中铣削力对槽顶毛刺的影响规律,采用仿真与试验相结合的方法。仿真与试验均采用两组试验:第一组取 $f_z = 2\mu\text{m}/z$,改变轴向切深获得不同轴向力和径向力;第二组取 $a_p = 20\mu\text{m}$,改变每齿进给量获得不同轴向力、径向力。通过仿真得出毛刺宽度与轴向力和径向力的关系。同时,采用试验的方法进行研究分析,试验得到毛刺宽度、轴向力、径向力的关系,从而分析轴向力与径向力对毛刺宽度的影响规律。

2.2 刀具及工件参数

在有限元仿真软件中对工件及刀具模型进行参数设置。刀具直径 $1000\mu\text{m}$,切削刃钝圆半径 $5\mu\text{m}$,工件尺寸为 $1.4\text{mm} \times 0.17\text{mm} \times 0.625\text{mm}$ 的黄铜工件,黄铜材料的各项参数来自 DEFORM 软件材料库。使用 UG 软件建立刀具和工件几何模型,然后导入 DEFORM 软件中。试验采用直径 1mm 的硬质合金刀具,工件尺寸 $20\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。

2.3 铣削参数

仿真与试验采用两组对照试验获得轴向力、径向力与毛刺宽度的关系。主轴转速均为 $60000\text{r}/\text{min}$,第一组保持每齿进给量 f_z 不变,取不同的轴向切深;第二组保持轴向切深不变,取不同的每齿进给量 f_z 。仿真与试验中铣削参数根据先前研究分析所得^[7-9],试验参数选择与有限元仿真参数相对应,为了提高试验效率,试验参数取仿真中的一部分进行试验验证。参数设置见表1。

表1 仿真与试验铣削参数表

试验组数	不变因素1	不变因素2	仿真可变因素	试验可变因素
一组	$a_c = 1000\mu\text{m}$	$f_z = 2\mu\text{m}/z$	$a_p = 5, 10, 15, 20, 30, 40\mu\text{m}$	$a_p = 5, 15, 20, 25, 30\mu\text{m}$
二组	$a_c = 1000\mu\text{m}$	$a_p = 20\mu\text{m}$	$f_z = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0\mu\text{m}/z$	$f_z = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5\mu\text{m}/z$

2.4 试验机床

试验采用三轴微细铣削数控机床 3A - S100,以

PMAC 高性能运动控制器作为机床上位机的开放式控制系统,采用转速为 $80000\text{r}/\text{min}$ 的空气涡轮驱动主轴和高速空气轴承。机床径向跳动和轴向窜动均在 $1\mu\text{m}$ 以内,足以保证本次试验的加工精度,实现高精密加工微小零件。

2.5 试验总体布局

采用两组试验进行对比,中间为 $0.03\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的水平通槽,试验总体布局见图1。第一组试验通过改变不同的轴向切深,如图1中1-5组所示;第二组试验通过改变不同的每齿进给量 f_z ,如图1中6-10组所示。

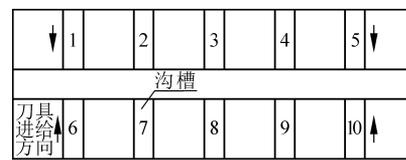
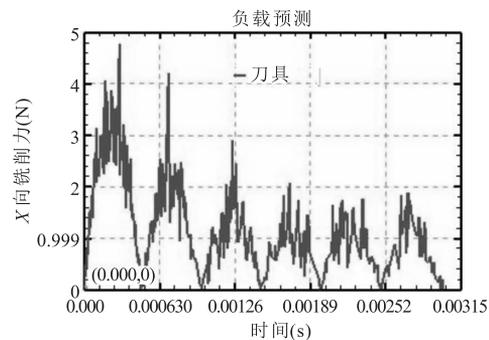


图1 试验总体布局

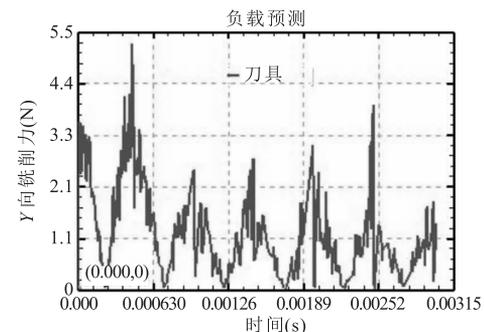
3 仿真试验结果分析

3.1 仿真 X、Y、Z 方向分力

两组仿真中产生不同的铣削力,选取 $a_p = 20\mu\text{m}$, $f_z = 0.5\mu\text{m}/z$ 时的三力变化见图2,即 X、Y、Z 方向分力。可见,X、Y、Z 三方向铣削力刚开始未达到稳定铣削状态,一定时间过后三方向分力变化平稳,即达到稳定铣削状态。通过导出三方向分力,求平均值获得仿真铣削力的大小。



(a) X 向



(b) Y 向

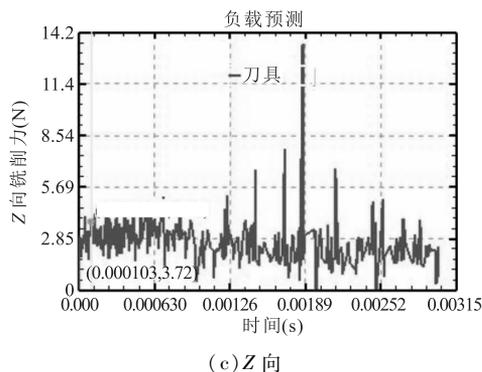


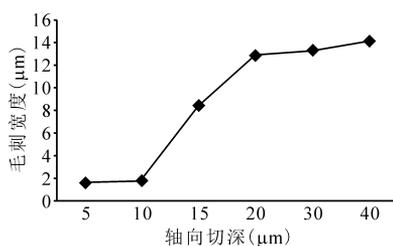
图2 $a_p = 20\mu\text{m}$ 、 $f_z = 0.5\mu\text{m}/\text{z}$ 的铣削力

3.2 仿真试验结果分析

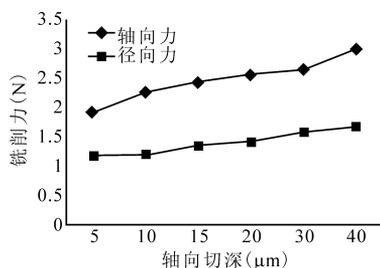
在仿真过程中,为了确保计算结果的准确性,当刀具进给量大于刀具半径,即刀具达到稳态铣削时,选取切削力的峰值平均值的方法分别获得 X 、 Y 、 Z 三向分力,即 F_x 、 F_y 、 F_z 。其中, F_z 即为轴向力,径向力 F_r 由其他两向力计算获得

$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (1)$$

毛刺宽度计算方法是通过通过对多处的毛刺宽度求和取平均值,从而得到每组仿真中不同的径向力、轴向力及毛刺宽度对应的关系。将仿真试验中毛刺宽度、轴向力、径向力与铣削参数分别绘制成折线图(见图3和图4)。



(a) 毛刺宽度与轴向切深关系



(b) 轴向力、径向力与轴向切深关系

图3 毛刺宽度、轴向力、径向力与轴向切深关系

由图3a可知,第一组仿真分析中,毛刺宽度随轴向切深的变化,刚开始变化时较小,这是由于刚开始轴向切深太小,刀具与工件接触面积小,毛刺宽度变化不明显,当轴向切深达到 $10\mu\text{m}$ 以后,铣削较为稳定,毛刺宽度随轴向切深的增大而增大。

由图3b可知,轴向力、径向力均随着轴向切深

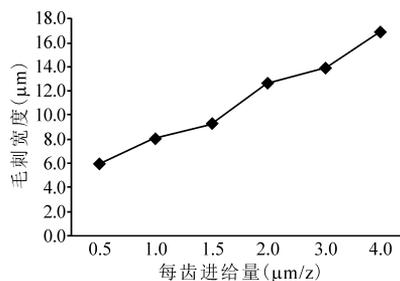
的增大而增大,且增长趋势平稳。由于仿真中刀具刃圆半径 $5\mu\text{m}$,根据 H. Weule 等^[10]和 M. P. Vogler 等^[11]的研究可知,最小临界未变形切屑厚度约为刃圆半径 $0.2 - 0.4$ 倍,即最小轴向临界未变形切屑厚度约为 $1 - 2\mu\text{m}$ 。选择的最小轴向切深大于临界未变形切屑厚度,避开了微细铣削中存在的尺度效应影响,因此轴向力、径向力均随轴向切深的变化呈现递增趋势。

通过图3a和图3b两图的比较分析可以发现,毛刺宽度、轴向力、径向力均随轴向切深的增大而增大。因此可以定性得出,毛刺宽度随轴向力、径向力的增大而增大。

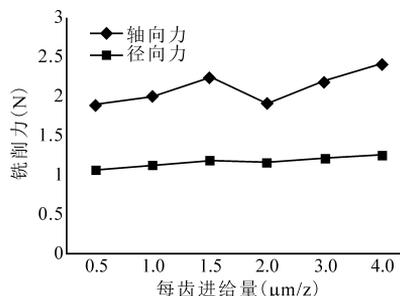
由图4a可知,第二组仿真分析中,当轴向切深不变,只改变每齿进给量来获得不同的径向力与轴向力时,毛刺宽度随每齿进给量的增大而增大。

由图4b可见,轴向力随每齿进给量变化的总体趋势是轴向力随每齿进给量的增大而增大,但在 $f_z = 1.5\mu\text{m}/\text{z}$ 时呈小幅降低趋势,这是由于仿真中刀具刃圆半径为 $5\mu\text{m}$,受微细铣削中尺度效应影响,当切削用量降低到微米级时,微切削过程中会出现明显的尺度效应、临界未变形切屑厚度现象及犁切效应^[12],但总体趋势径向力随每齿进给量的增大而增大。

由图4b可知,径向力随每齿进给量的增大而增大,但当 $f_z = 1.5\mu\text{m}/\text{z}$ 时,呈现小幅降低趋势,这是由于受微细铣削中尺度效应影响,但总体趋径向力随每齿进给量的增加而增加。



(a) 毛刺宽度与每齿进给量的关系



(b) 轴向力、径向力与每齿进给量的关系

图4 毛刺宽度、轴向力、径向力与每齿进给量的关系

通过图4a和图4b两图对比分析可以得出,毛

刺宽度、轴向力和径向力随每齿进给量的增大而增大。因此,可以定性分析得出毛刺宽度随轴向力和径向力的增大而增大的规律。

4 铣削试验

在试验过程中利用 KISTLER 测力仪测量铣削过程中径向力和轴向力值。

4.1 试验槽顶毛刺结果

试验结果通过使用细聚焦电子束扫描样品表面信息的 SEM (Scanning Electron Microscope) 进行毛刺测量,试验结果如图 5 所示,1-5 组为第一组试验结果,6-10 组为第二组试验结果,两组试验铣削方式均为顺铣。可以清晰地看到毛刺宽度的变化,第一组、第二组毛刺宽度随参数变化趋势为先增大后减小的趋势。

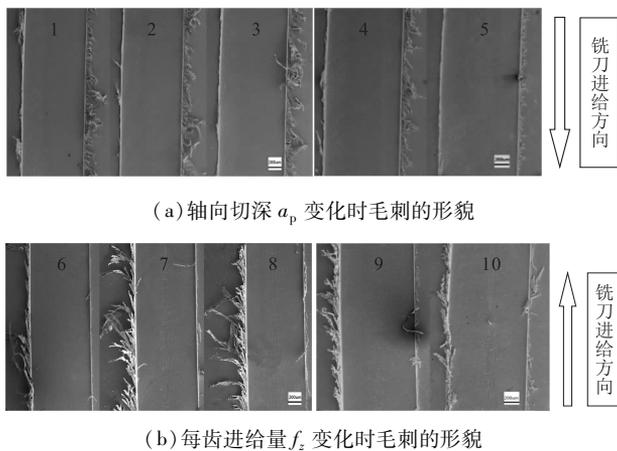


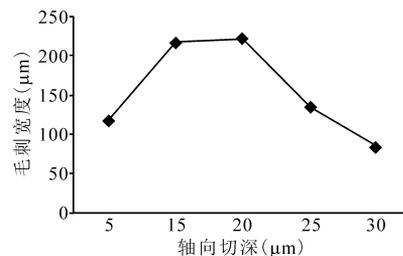
图 5 试验结果

4.2 铣削力对毛刺宽度的影响分析

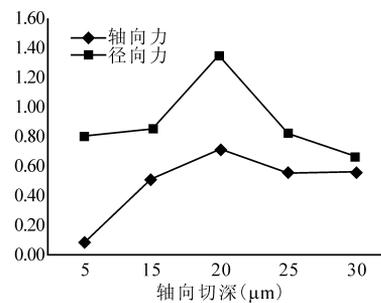
当切削长度为 2mm 时,切削长度大于刀具半径 ($r = 500\mu\text{m}$),此时计算稳态铣削时 X 、 Y 、 Z 三个方向的分力,即 F_x 、 F_y 、 F_z 。通过计算切削力峰值平均值的方法获得 X 、 Y 、 Z 方向分力,通过式(1)计算得到不同径向力 F_r 。毛刺宽度是通过对所有毛刺宽度求和取平均值的方法得到。两组试验中将毛刺宽度、轴向力、径向力与铣削参数绘制成折线图(见图 6 和图 7)。

从图 6a 可以看出,第一组试验结果中毛刺宽度和轴向力的变化规律,毛刺宽度随轴向切深的变化,呈现先增大后减小的趋势,即当轴向切深小于 $20\mu\text{m}$ 时,毛刺宽度随轴向切深的增大而增大;当轴向切深大于 $20\mu\text{m}$ 时,毛刺宽度随轴向切深的增大而减小。这主要是由于试验加工中所使用的刀具刃圆半径与仿真中刀具刃圆半径不一致造成的,从而不能与仿真中毛刺宽度随参数变化趋势完全相同。

由图 6b 可知,轴向力随轴向切深的增大先增大后减小,即当轴向切深小于 $20\mu\text{m}$ 时,轴向力随轴向切深的增大而增大;当轴向切深大于 $20\mu\text{m}$ 时,轴向力随轴向切深的增大而减小。刚开始轴向力变化较快,这是由于轴向切深太小,有可能造成底刃切削时未变形切屑厚度小于临界值,从而轴向力变化比较明显。径向力随轴向切深的增大也是先增大后减小的趋势,即当轴向切深小于 $20\mu\text{m}$ 时,径向力随轴向切深的增大而增大,变化比较明显;当轴向切深大于 $20\mu\text{m}$ 时,径向力随轴向切深的增大而减小。



(a) 毛刺宽度与轴向切深的关系



(b) 轴向力、径向力与轴向切深的关系

图 6 毛刺宽度、轴向力、径向力与轴向切深的关系

从图 6a 和图 6b 分析可知,毛刺宽度、轴向力、径向力随轴向切深的增大其趋势为先增大后减小。从而定性分析可知,毛刺宽度随轴向力、径向力的增大而增大。虽然试验中毛刺宽度、轴向力、径向力随轴向切深的变化趋势与仿真中不同,但是毛刺宽度随轴向力、径向力的变化趋势相同,即毛刺宽度随轴向力、径向力的增大而增大,从而验证仿真中分析的可靠性。

从图 7a 中可以看出,第二组试验结果中毛刺宽度随每齿进给量的增大先增大后减小,即当每齿进给量小于 $1 - 1.5\mu\text{m}/z$ 时,毛刺宽度随每齿进给量的增大而增大;当每齿进给量大于 $1 - 1.5\mu\text{m}/z$ 时毛刺宽度随每齿进给量的增大而减小。

由图 7b 可知,轴向力随每齿进给量的增大先增大后减小,即当每齿进给量小于 $1 - 1.5\mu\text{m}/z$ 时,轴向力随每齿进给量的增大而增大;当每齿进给量大于 $1 - 1.5\mu\text{m}/z$ 时,轴向力随每齿进给量的增大而减小。径向力随每齿进给量的增大先增大

后减小,即当每齿进给量小于 $1-1.5\mu\text{m}/\text{z}$ 时,径向力随每齿进给量的增大而增大;当每齿进给量大于 $1-1.5\mu\text{m}/\text{z}$ 时,径向力随每齿进给量的增大而减小。

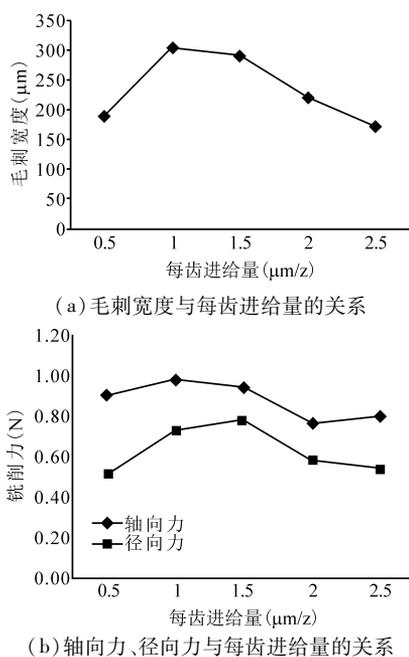


图7 毛刺宽度、轴向力、径向力与轴向切深的关系

从图7a和图7b分析可知,毛刺宽度、轴向力、径向力随轴向切深的增大先增大后减小。毛刺宽度随轴向力、径向力的增大而增大。虽然试验中毛刺宽度、轴向力、径向力随每齿进给量的变化趋势与仿真中不同,但是毛刺宽度随轴向力、径向力的变化趋势相同,即毛刺宽度随轴向力、径向力的增大而增大。

5 结语

(1) 当微细铣削参数大于临界未变形切屑厚度时,毛刺宽度随轴向切深、每齿进给量的增大而增大,轴向力、径向力随轴向切深、每齿进给量的增大而增大。

(2) 试验加工过程中,当微细铣削参数大于临界未变形切屑厚度时,毛刺宽度随轴向切深、每齿进给量的增大先增大后减小,轴向力、径向力随轴向切深、每齿进给量的增大先增大后减小。

(3) 通过仿真及试验结果的定性分析可知:毛刺宽度总体趋势随着轴向力、径向力的增大而增大。

因此,在后续的微细铣削参数优化中,可以将切削力作为优化指标,间接地实现毛刺尺度的降低。

参考文献

[1] 寇兆军,万熠,蔡玉奎,等. 微细铣削加工中抑制微毛刺

生成的新方法[J]. 工具技术,2015,49(8):7-11.

- [2] 杨城. 微细铣削毛刺形成及其控制技术研究[D]. 镇江: 江苏大学,2015.
- [3] Vivek Bajpai, Ajay K Kushwaha, Ramesh K Singh. Burr formation and surface quality in high speed micromilling of titanium alloy (Ti6Al4V) [C]. The ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2013, 12(16):2-8.
- [4] G Kiswantoa, D L Zariatina, T J Ko. The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of aluminum alloy 1100 in micro-milling operation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16(4):435-450.
- [5] 倪海波. 微细铣削加工毛刺的形成过程仿真与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2012.
- [6] 曹自洋,何宁,李亮. 微细铣削毛刺试验研究[J]. 工具技术,2010,44(9):24-26.
- [7] 李元镇,程祥,孟繁杰. PMMA 微细铣削参数优化试验研究[J]. 制造技术与机床,2016(2):21-26.
- [8] Xiang Cheng, Li Li, Yumei Huang, et al. Theoretical modeling of the critical conditions for ductile-regime milling of single crystalline silicon[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(8):1462-1469.
- [9] Xiang Cheng, X H Yang, G M Zheng, et al. Fabrication accuracy analysis of micromilling tools with complicated geometries by wire EDM2[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(6):2329-2335.
- [10] H Weule, V Huntrup, H Tritschler. Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization annals of the CIRP[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2001, 50(1):61-64.
- [11] M P Vogler, R E Devor, S G Kapoor, et al. On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(4):684-693.
- [12] 靳赛. 微细铣削表面质量及毛刺形成的试验研究[D]. 济南: 山东大学,2013.
- 第一作者:孙秋莲,硕士,山东理工大学机械工程学院,255049 山东省淄博市
- First Author: Sun Qiulian, Master, School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China
- 通信作者:程祥,博士后,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, Post-doctoral, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China