

文章编号 1004-924X(2009)05-1086-07

微切削加工中切削力的理论与实验

李晓舟,于化东,许金凯,李一全,赵平
(长春理工大学机电工程学院,吉林 长春 130022)

摘要:微切削过程中的切削力严重影响刀具寿命及零件的加工精度,因此,深入研究微切削过程中的切削力变化规律及影响因素是确定合理的加工参数、加工工艺及提高加工系统性能的基础。本文在考虑刀具钝圆半径存在的条件下,采用轴对称原理建立了微切削力理论公式及微切削模型,实验研究了切削用量、刀具材料及工件材料对切削力的影响,验证了理论分析的正确性。研究结果表明:在切深 a_p 为 0.002~0.032 mm,进给量 f 为 0.01~0.20 mm/r,切削速度 v 为 20~120 m/min 情况下,切削力 F_z 的变化范围为 100~1030 N, F_y 的变化范围为 40~700 N;减小刀具钝圆半径会减小刀具后刀面与工件的接触长度,并且会减小切削刃以下部分金属的变形,有利于获得高质量的加工表面;控制切削速度对切削力的影响可以通过控制切削层厚度与刀具钝圆半径的比值来实现,控制切削力比值 F_z/F_y 则可以通过控制走刀量、切深与刀具钝圆半径的比值来实现。

关键词:微切削;切削力;钝圆半径;微切削机理

中图分类号: TG501; TG113.2 **文献标识码:** A

Theory and experiments of cutting forces in micro-cutting process

LI Xiao-zhou, YU Hua-dong, XU Jin-kai, LI Yi-quan, ZHAO Ping

(*Electromechanical Engineering College, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

Abstract: In micro cutting process, cutting forces affect greatly the tool life and the machining precision. Therefore, it is very significant to study the variations of cutting forces and the factors affecting the forces for determining the machining parameters and for improving the performance of machining systems. In this paper, the theoretical formulas and mathematical model of the micro cutting are established to calculate the cutting forces by using the axi symmetric theorem and by considering effects of the rounded edge radius of a cutting tool. The effects of cutting parameters, tool materials and workpiece materials on the cutting forces are analyzed, and the experiments are coincident with the theoretical analysis well. The results show that, when the cutting depth a_p , amount of feed f and the cutting speed v range in 0.002—0.032 mm, 0.01—0.20 mm/r and 20—120 m/min, respectively, the forces F_z and F_y change in 100—1030 N and 40—700 N. Also, decreasing the rounded edge radius will reduce the contact length between the tool flank surface and the workpiece and the deformation of the workpiece ma-

收稿日期:2008-08-07;修订日期:2008-08-29.

基金项目:国防基础科研基金资助项目(No. A3620080231);“十一五”预研支撑基金资助项目(No. 62301110706);长春市科技发展计划资助项目(No. 2006CC01)

materials below the cutting edge so that the quality of the machined surface is improved. Furthermore, the effect of cutting speed on the cutting force can be reduced by controlling the ratio of the cutting depth to the rounded edge radius, and the ratio of F_z/F_y can be controlled by adjusting the ratios of the feed per revolution and cutting depth to the rounded edge radii.

Key words: micro-cutting process; cutting force; rounded edge radius; micro cutting mechanism

1 引言

高精度三维微小零件广泛应用于航空航天、国防工业、微电子工业及生物工程等领域。目前,其加工主要有两种方法:一是基于半导体制造工艺、光刻技术、MEMS 和 LIGA 技术的方法,该方法存在加工材料单一、加工设备昂贵、加工零件结构受限制等问题^[1-3];二是利用常规超精密机床进行加工的方法,该方法存在占地面积大、能耗大、成本高、灵活性差等缺点。

近年来,通过微小型制造设备,采用微细切削加工技术与微机械制造方法加工介观尺度零件已引起各国极大的关注和重视^[4-5]。我国也广泛开展了微小机床及其关键部件的研制^[6-7],以及微切削基础理论和微切削应用技术的研究^[8-10]。

微切削加工的显著特点是切削厚度与刀具刃口钝圆半径在数量级上相当,常规描述的切削变形及切削力的理论和方法不再适用。微切削加工的切削变形、切削力的变化及其影响因素更为复杂^[11-16],例如,在微切削过程中的振动,切削力对加工性能、刀具寿命以及零件的加工精度的影响^[17-19]。因此,深入研究微切削过程中切屑形成的机理和切削力变化规律及其影响因素,是确定合理的加工参数、加工工艺及加工系统设计的关键基础。

本文在分析微切削变形的基础上,采用轴对称原理深入研究了微切削力的变化及其影响因素,通过实验研究了切削用量、刀具材料及工件材料对切削力的影响,验证了分析的正确性,为微切削加工工艺的实现奠定了基础。

2 微切削加工中的切削力

微切削过程中,由于切削厚度值微小,必须考虑刀具切削刃钝圆半径的影响。如图 1 所示,切削时切削层沿 Od 线与金属基体分离形成切

屑, O 点为切屑分界点, O 点以上的待切削层金属沿 OM 滑移之后沿刀具切削刃钝圆 OG 、刀具前刀面 GH 摩擦流出形成切屑。 O 点以下待切削层金属一部分挤过刀具切削刃钝圆 OM 下方并发生摩擦,再沿后刀面 MN 摩擦,然后流出形成已加工表面;另一部分做侧向塑性流动。微切削时在刀具前方形形成塑性变形区,此区深入到切削线 ab 以内一定深度,这样,加工表面的金属也产生塑性变形。被切金属在 O 点以下的刀具切削刃钝圆圆弧挤压作用下发生变形,并且已变形的金属又受到 Δ_r 及 Δ_l 的挤压和摩擦进一步发生变形,如图 2 所示。减小刀具切削刃钝圆半径 ρ 值有利于减小微切削中的切屑变形。

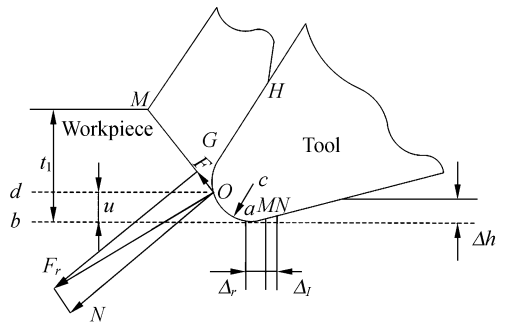


图 1 微切削表面形成

Fig. 1 Machined surface formation in micro-cutting process

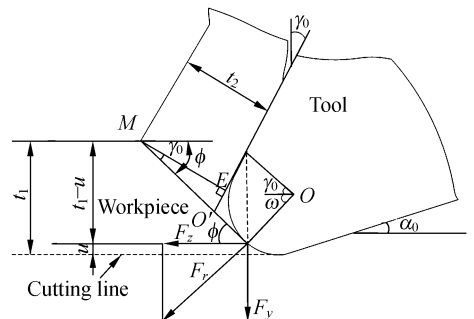


图 2 微切削加工切屑变形

Fig. 2 Chip deformation in micro-cutting process

微切削加工时的切削力来源于两方面,一是切削层金属、切屑和工件表面层金属的弹性变形及塑性变形所引起的抗力;二是刀具前刀面与切屑、刀具后刀面与工件已加工表面之间的摩擦阻力。微切削加工较常规切削(假设刀具切削刃钝圆半径 $\rho=0$)加工的切削力平衡关系不同,如图 3、图 4 所示。

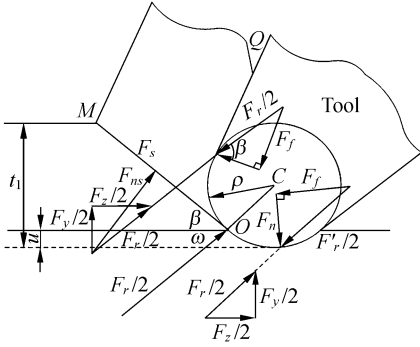


图 3 微切削加工切削力

Fig. 3 Cutting force in micro-cutting process

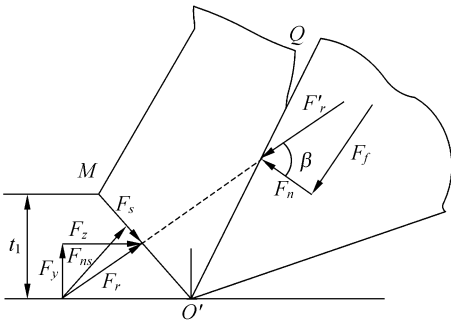


图 4 常规切削时切削力

Fig. 4 Cutting force in conventional cutting

微切削中,用偏光弹性法测量切削刃钝圆半径及其附近的应力分布状态的实验表明, O 点处的剪应力 $\tau_t=0$,正应力 σ_t 为最大,而且 τ_t, σ_t 是关于连线 CO 对称的, F_r 在 CO 方向上。假定切削合力 F_r 通过切屑分界点 O 和刀具切削刃钝圆中心点 C ,以 CO 为对称轴,按轴对称问题来处理切削作用力的平衡关系。

在 O 点以上,刀具作用于切屑的合力为 $F_r'/2$;在 O 点以下,刀具作用于工件的合力为 $F_r'/2$,并且此二力相对于 CO 连线对称,又与 CO 连线平行,因此只考虑 O 点以上部分即可。取切屑 MOQ 作为自由隔离体,可得出前刀面上的平

均摩擦系数为 $\mu = \tan \beta = F_f/F_n$ 。

剪切面上的剪切力为:

$$F_{smice} = \tau_s \cdot b \cdot \frac{t_1 - u}{\sin \phi} = \tau_s \cdot \frac{[t_1 - \rho(1 - \sin \omega)]}{\sin \phi} = \frac{\tau_s b [t_1 - \rho + \rho \sin(\beta - \gamma_0)]}{\sin \phi}, \quad (1)$$

式(1)中, τ_s 为剪切面上的剪应力, b 为切削宽度, β 为摩擦角,由图 3 作用力关系可知:

$$\frac{F_{rmice}}{2} \sin(90^\circ - \omega - \phi) = F_{smice}$$

$$F_{rmice} = \frac{2F_{smice}}{\sin(90^\circ - \beta + \gamma_0 - \phi)} = \frac{2\tau_s b [t_1 - \rho + \rho \sin(\beta - \gamma_0)]}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}, \quad (2)$$

故:

$$F_{zmicc} = F_{rmice} \cdot \cos(\beta - \gamma_0) = \frac{2\tau_s b [t_1 - \rho + \rho \sin(\beta - \gamma_0)] \cos(\beta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}, \quad (3)$$

$$F_{ymice} = F \cdot \sin(\beta - \gamma_0) = \frac{2\tau_s b [t_1 - \rho + \rho \sin(\beta - \gamma_0)] \sin(\beta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}. \quad (4)$$

根据最小切削合力原理, ϕ 应使切削合力 F_{rmice} 为最小值。

$$\text{令: } \frac{dF_{rmice}}{d\phi} = 0 \text{ 即 } \cos(2\phi + \beta - \gamma_0) = 0,$$

所以:

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} + \frac{\gamma_0}{2}, \quad (5)$$

式(5)为微切削加工的切削方程式,这一表达形式与常规切削加工中的切削方程式完全相同。

设常规切削时的切削合力为 F_{rc} ,切削分力分别为 F_{xc}, F_{yc} ,微切削与常规切削的切削力变化量为:

$$\Delta F_r = \frac{F_{rmice}}{2} - F_{rc} = -\frac{\tau_s b \rho [1 - \sin(\beta - \gamma_0)]}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}, \quad (6)$$

$$\Delta F_z = \frac{F_{zmicc}}{2} - F_{zc} = -\frac{\tau_s b \rho [1 - \sin(\beta - \gamma_0)] \cos(\beta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}, \quad (7)$$

$$\Delta F_y = \frac{F_{ymice}}{2} - F_{yc} = -\frac{\tau_s b \rho [1 - \sin(\beta - \gamma_0)] \sin(\beta - \gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)}. \quad (8)$$

由式(6)、(7)、(8)可见,随 ρ 值的增加, ΔF_x , ΔF_z , ΔF_y 变大。这说明,单就刀具前刀面受力而言,微切削时前刀面所受切削力要小于常规切削前刀面所受的切削力。

假设微切削时刀具所受的总切削力与常规切削相等,则以上分析表明:随着 ρ 值的增加,微切削时刀具前刀面上切削力所占的比例较常规切削时所占的比例要小,而后刀面上切削力所占的比例较常规切削时所占比例要大。即常规切削($\rho=0$)时,切削力完全由刀具前刀面承受,而微切削($\rho \neq 0$)时,切削力除由前刀面承受外,刀具后刀面也要承受一部分,并且随着 ρ 值的增大,刀具后刀面承受切削力的比例增大。

刀具后刀面总的接触长度是刀具切削刃 O 点以下的切削刃钝圆部分、 Δ_r 及 Δ_l 之和,如图 1 所示。微切削时刀尖切削刃以下加工表面的变形之所以复杂,是由于微切削时切削刃钝圆半径的 ρ 影响,虽然对于常规切削时刀具切削刃也有钝圆存在,但对加工表面质量的影响较微切削时要小得多。在微切削中,切削刃钝圆 ρ 的减小使得切削刃 O 点以下的钝圆部分及 Δ_l 减小,也即减小了刀具后刀面与工件的接触长度及金属的变形,这无疑对获得高质量的加工表面是有利的。

3 微切削时切削力的影响因素

3.1 切削用量的影响

3.1.1 切削速度的影响

微切削时切削速度 v 对微切削力的影响结果如图 5、图 6 所示。高速钢车刀切削加工时,切削速度对微切削力的影响不明显,这是因为刀具前刀面前切削区的变形及摩擦在整个切削变形中占的比例较小,因此当切削速度增加时,这部分变形及摩擦不明显;同时由于高速钢车刀的切削刃钝圆半径 ρ 较大,切削刃钝圆圆弧部分对加工表面所产生的挤压力所占的比例较大,而切削速度的增加对其影响很小。而用金刚石车刀进行微切削时,金刚石车刀的切削刃钝圆半径比高速钢车刀的小得多,虽然切削用量相同,但刀具前刀面前切削区的变形及摩擦所占的比例较大,当切削速度

增加时,这部分变形及摩擦减小。用金刚石车刀进行微切削时,随着切削速度的增加,切削力下降。可见,切削速度对切削力的影响取决于 t_1/ρ 值的大小,因此控制 t_1/ρ 值就可以控制切削速度对切削力大小的影响。

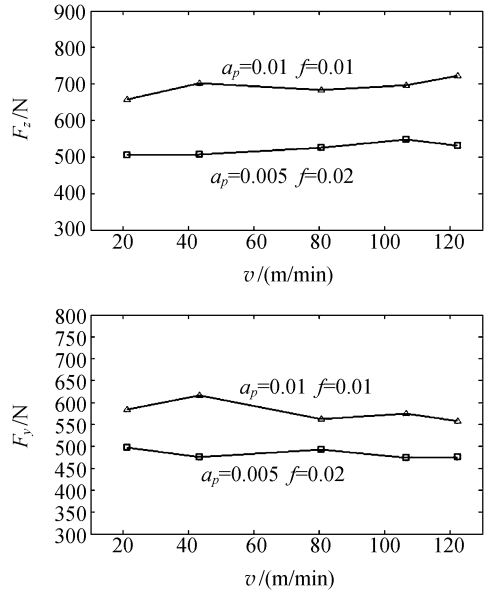


图 5 微切削中切削速度对切削力的影响(HSS 刀)
Fig. 5 Effect of outting speeds on cutting forces in micro-cutting process(HSS)

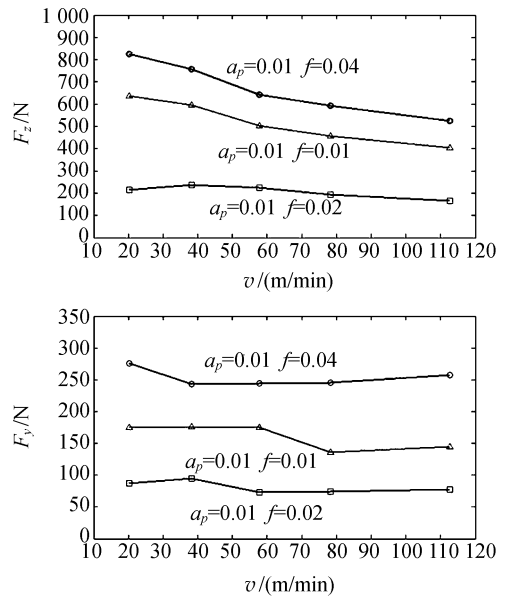


图 6 微切削中切削速度对切削力的影响(金刚石刀)
Fig. 6 Effect of cutting speeds on cutting forces in micro-cutting process(diamond)

3.1.2 进给量的影响

进给量和切削深度决定切削体积大小,因而进给量是影响切削的一个重要因素,如表 1、表 2 所示。

表 1 进给量对切削力的影响(HSS 刀)

Tab.1 Influence of feed amounts on cutting forces (HSS)

切削力 (N)	进给量 $f/(mm/r)$				
	0.01	0.02	0.04	0.10	0.20
F_z	60	100	350	570	900
F_y	240	280	410	580	700

表 2 进给量对切削力的影响(金刚石刀)

Tab.2 Influence of feed amounts on cutting forces (diamond)

切削力 (N)	进给量 $f/(mm/r)$				
	0.01	0.02	0.04	0.10	0.20
F_z	200	260	480	900	1030
F_y	40	50	120	170	200

用高速钢车刀进行微切削时,进给量对切削力有明显的影 响,进给量对 F_z 的影响比对 F_y 的影响大,当进给量小于一定值时, $F_y > F_z$,这一点在微切削时比较特殊。在用金刚石车刀进行微切削时, $F_z > F_y$ 。

3.1.3 切削深度的影响

用高速钢、金刚石车刀进行微切削时,切削深度对切削力也有一定影响,如表 3、表 4 所示。

由表 3 可见,切削深度对 F_z 的影响比对 F_y 的影响大,切削深度小于一定值时,则 $F_y > F_z$ 。由表 4 可见,用金刚石车刀进行微切削时,与进给量对切削力的影响相似,仍然有 $F_z > F_y$ 的规律。这是由于切削用量的大小决定着 F_z 的大小,切削刃钝圆半径 ρ 的大小决定刀具后刀面上正压力大小,直接影响着 F_y 的大小,因此当切削用量减小时, F_z 不断减小。由于切削刃钝圆半径是固定值,所以当切削用量减小到一定值后,才有 $F_y > F_z$ 。但金刚石可以刃磨得很锋利,切削刃钝圆半径比高速钢刀具要小几倍,因此由切削刃钝圆圆弧部分产生的挤压小,刀具后刀面的正压力小,从而 F_y 小,虽然是微量切削,仍然有 $F_z > F_y$ 。

表 3 切削深度对切削力的影响(HSS 刀)

Tab.3 Influence of cutting depths on cutting forces (HSS)

切削力 (N)	切削深度 $a_p/(mm)$				
	0.002	0.004	0.008	0.016	0.032
F_z	80	150	370	520	670
F_y	250	270	330	370	390

表 4 切削深度对切削力的影响(金刚石刀)

Tab.4 Influence of cutting depths on cutting forces (diamond)

切削力 (N)	切削深度 $a_p/(mm)$				
	0.003	0.006	0.01	0.02	0.03
F_z	100	170	260	450	500
F_y	20	30	50	70	90

可见, F_z/F_y 值取决于切削用量(f, a_p)同 ρ 的比值,当切削用量同 ρ 之比达到一定值时,有 $F_y > F_z$,因此控制切削用量同 ρ 之比就能控制 F_z, F_y 比值的大小。在常规切削时,切削深度 a_p 对切削力的影响大于进给量 f 对切削力的影响。在微切削时,恰好相反,进给量 f 对切削力的影响大于切削深度 a_p 对切削力的影响,这是因为微切削时常常会有 $f > a_p$ 而成为倒切削。

3.2 刀具材料的影响

实验表明,刀具材料对切削力影响很大,因金刚石对有色金属的摩擦系数比高速钢要小许多,而高速钢车刀的切削刃钝圆半径比金刚石的大许多,所以用高速钢车刀加工有色金属时摩擦及挤压比采用金刚石车刀加工时要大,切削力也大大增加。

3.3 工件材料的影响

表 5 为用金刚石车刀微切削 H62 黄铜、LY12-C_z 硬铝及 TV1 无氧铜时切削力的实验结果。

表 5 工件材料对切削力的影响

Tab.5 Influence of workpiece materials on cutting forces

工件材料	切削力/N			修正系数		
	F_z	F_y	F_x	K_{Hz}	K_{Hy}	K_{Hx}
H62 黄铜	860	150	50	1	1	1
LY12-C _z 硬铝	1300	440	120	1.51	2.93	2.45
TV1 无氧铜	2650	970	250	3.08	6.46	5.00

材料的强度与硬度高,变形抗力大,则切削力大;材料的塑性大,在切削时产生的塑性变形大,硬化强烈,而且切屑与前刀面的摩擦系数大,接触区长,故切削力大。LY12-C_z 硬铝的强度和塑性都比 H62 黄铜大,故切削力也较大。而 TV1 无氧铜的塑性比 LY12-C_z 硬铝、H62 黄铜的塑性大得多,因此切削力最大。

4 结 论

本文的理论和实验研究表明,在微切削加工

中,由于是微量切削,切削刃钝圆半径对切屑变形系数及切削力的影响十分重要,而由于切削刃钝圆的存在使微切削过程中切削区的变形更为复杂;尽可能地减小小刀具切削刃钝圆半径 ρ 值对减小切屑变形系数、减小切削力以及减小刀具后刀面附近的工件已加工表面的金属变形程度都有利;另外依靠控制 t_1/ρ 值可实现控制切削速度对切削力的影响;而依靠控制 $(f, a_p)/\rho$ 值可实现控制切削力比值 F_z/F_y 。

参考文献:

- [1] KURITA T, HATTORI M. Development of new-concept desk top size machine tool[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture Design Research and Application*, 2005,45:959-965.
- [2] 孙雅洲, 梁迎春. 微米和中间尺度机械制造[J]. *机械工程学报*, 2004,40(5):1-6.
SUN Y ZH, LIANG Y CH. Micro-scale and meso-scale mechanical manufacturing[J]. *Chinese Journal of Mechanical Manufacturing*, 2004,40(5):1-6. (in Chinese)
- [3] 郭锐, 赵万生, 李刚. 微细电火花加工的微细电极在线检测[J]. *光学精密工程*, 2006,14(6):998-1003.
GUO R, ZHAO W SH, LI G. Micro elect rodes on-line measurement in micro EDM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(6):998-1003. (in Chinese)
- [4] LIU X, DEVOR R E, KAPOOR S G, *et al.*. The mechanics of machining at the micro scale: assessment of the current state of the science[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126:666-678.
- [5] LIU X, JUN M B, DEVOR R E, *et al.*. Cutting mechanisms and their influence on dynamic forces, vibrations and stability in micro-end milling[C]. *Proceedings ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim California, Nov*, 2004,13-20.
- [6] 孙麟治, 李鸣鸣, 程维明. 精密定位技术[J]. *光学精密工程*, 2005,13(增):69-75.
SUN L ZH, LI M M, CHENG W M. Study on precision positioning technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(supp):69-75. (in Chinese)
- [7] 赵岩, 梁迎春, 白清顺, 等. 微细加工中的微型铣床、微刀具磨损及切削力的实验研究[J]. *光学精密工程*, 2007,15(6):894-902.
ZHAO Y, LIANG Y CH, BAI Q SH, *et al.*. Micro-milling machine tool, micro-tool wear and cutting forces in micro-machining [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(6):894-902. (in Chinese)
- [8] CHAE J, PARK S S. High frequency bandwidth measurements of micro cutting forces[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007(47):1433-1441.
- [9] 蔺小军. 金属切削刀具的有限元分析[D]. 西安:西北工业大学, 1999.
LIN X J. *FEM analysis of metal cutting tools* [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University, 1999. (in Chinese)
- [10] 王家畴, 荣伟彬, 孙立宁, 等. 新型集成三维微力检测微夹持器[J]. *光学精密工程*, 2007,15(4):550-556.
WANG J CH, RONG W B, SUN L N, *et al.*. A novel micro-gripper integrating micro tri-axial force sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4):550-556. (in Chinese)
- [11] CHAE J, PARK S S, FREIHEIT T. Investigation of micro-cutting operations [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006, 46:313-332.
- [12] ZONG W J, CHENG K, LI D, *et al.*. The ultimate sharpness of single-crystal diamond cutting tools-PartI: theoretical analyses and predictions [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007,47:852-863.
- [13] PARK H W. *Development of micro-grinding mechanics and machine tools* [D]. Atlanta: Georgia

Institute of Technology, April, 2008;26-31.

- [14] LIU K, MELKOTE SH N. Finite element analysis of the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2007, 49: 650-660.
- [15] LIU K, MELKOTE SH N. Effect of plastic side flow on surface roughness in micro-turning process [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46:1778-1785.
- [16] BISSACCO G, HANSEN H N, SLUNSKY J. Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling[C]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2008, 57:113-116.
- [17] TANSEL I, NEDBOUYAN A, TRUJILLO A, et

al.. Micro-endmilling-extending tool life with a smart work piece holder[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1998, 38: 1437-1448.

- [18] TANSEL I N, ARKAN T T, BAO W Y, et al.. Tool wear estimation in micro-machining. Part 1: tool usage cutting force relationship[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, 40(4):599-608.
- [19] TANSEL I N, ARKAN T T, BAO W Y, et al.. Tool wear estimation in micro-machining. Part 2: neural-network-based periodic inspector for non metals [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, 40(4):609-620.

作者简介:



李晓舟(1963—),男,黑龙江宾县人,硕士,副教授,1990年于长春光学精密机械学院获硕士学位,主要从事微细切削加工与微机械制造技术、微切削稳定性在线监测与控制技术以及精密超精密加工技术的研究。E-mail: lixiaozhou@gdx@sian.com



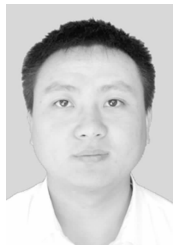
李一全(1968—),男,吉林长春人,博士研究生,副教授,1998年于浙江大学获硕士学位,主要从事精密与超精密加工技术和微细切削加工理论等方面的研究。E-mail: lyquancn@yahoo.com.cn



于化东(1961—),男,吉林松原人,工学博士,教授,博士生导师,1998年于日本千叶大学获博士学位,主要从事硬脆材料精密加工技术、精密与超精密加工技术以及微光机电一体化技术等方面的研究。E-mail: yuhd@cust.edu.cn



赵平(1972—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事微细切削加工与微机械制造方面的研究。E-mail: bigapple@tom.com



许金凯(1978—),男,吉林永吉人,博士研究生,助理研究员,2005年于长春理工大学获硕士学位,主要从事超精密加工与检测技术、微细切削加工与微机械制造方面的研究。E-mail: xujinkai2000@163.com