

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.042

圆弧刃刀具微细非自由切削参数建模与预报*

刘志兵 王西彬 方泽平

(北京理工大学先进加工技术国防重点学科实验室, 北京 100081)

【摘要】 非自由切削是影响微细切削加工的重要效应之一。针对微细切削条件下刀具圆弧刃区切削干涉作用显著增强的特点,通过单元刀具之间切削干涉对切屑流动方向的影响分析,建立了圆弧刃刀具的排屑方向干涉模型。应用 Stabler 法则和最小能量耗散原理确定出圆弧刃刀具作纵向进给的切屑流动方向、等效切削刃、流屑角和非自由系数。选取不同进给量和切削深度的组合对以上非自由切削特征参数进行了数值预报,预报结果可用于微细切削非自由状态的评价和改善,以及切削用量的合理匹配。

关键词: 微细切削 非自由切削 最小能量耗散 等效切削刃 非自由系数 流屑角

中图分类号: TG501 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0204-05

Modeling and Prediction of Non-free-cutting Parameters on Micro-cutting with Rounded-edge Tool

Liu Zhibing Wang Xibin Fang Zeping

(Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract

Non-free-cutting is an effect which affects the mechanism of micro cutting greatly. The influence of cutting intervene between elementary cutting tool on chip flow direction was analyzed, and chip flow intervene of the rounded-edge tool was mathematically modeled aims at the increase of cutting intervene caused by chip flow in the rounded-edge of micro cutting tool. Furthermore, chip flow direction, equivalent cutting edge and chip flow angle were deduced with Stabler rule and minimal energy dispersion principle respectively. Those above parameters were numerical predicted under different feed rate and cutting depth, and the prediction results can be used for the evaluation and improvement of micro-cutting status, as well as the optimization of cutting regimes.

Key words Micro-cutting, Non-free-cutting, Minimal energy dispersion, Equivalent cutting edge, Non-free-cutting coefficient, Chip flow angle

引言

非自由切削作为一类普遍采用的切削方式,对于切屑流动状态、切削力和切削表面等会产生一系列不良的加工效应,因而引起了国内外学者的极大关注。Stabler 通过实验建立了自然排屑角度与刀具刃倾角的关系^[1];Hagiwara 提出一种适用于多种轮廓成形车削的切屑流动预测模型^[2];Kimura 提出一

种切屑流动的仿真模型,用于指导立铣刀设计^[3];Kishawy 提出一种切屑流动方向的预报模型,分析了切削速度和进给量对流屑角的影响^[4];师汉民应用最小能量原理进行了非自由切削的排屑干涉和排屑协调分析,建立了切屑流动干涉、切屑变形和切削力的预报模型^[5-6];熊良山通过 V 字形刀具横切工件的切削实验验证了排屑速度干涉对切削力的影响^[7];王西彬分析了排屑干涉引起的流屑角和切削

收稿日期:2009-05-20 修回日期:2009-09-07

* 国家自然科学基金资助项目(50935001,50875026)和总装备部预先研究资助项目

作者简介:刘志兵,讲师,博士,主要从事精密与微细加工技术研究,E-mail: liuzhibing@bit.edu.cn

层参数对切屑流动方向的影响^[8-9]。

微细切削是实现多种工程材料微细结构精密加工的有效技术手段。微细切削条件下,由于采用的进给量和切削深度均较小,副切削刃和圆弧刃参与切削的程度显著增强,主切削刃与副切削刃,以及圆弧刃之间的切削干涉作用增强,并在材料去除和表面形成过程中发挥重要作用。因而微细切削的非自由程度将比常规尺度切削进一步增强。王西彬建立了一种包含有非自由切削干涉参数的圆弧刃切削公式,可用于非自由切削状态的改善^[9]。本文将在此基础上针对更具普遍意义的圆弧刃刀具纵向进给的情形,分析几何干涉参数和微细切削工艺参数的组合对于圆弧刃刀具非自由系数的影响。

1 圆弧刃刀具的非自由切削分析

1.1 切屑流动干涉分析

以微细车削为例,采用主切削刃与副切削刃之间以直线刃过渡的刀具是获得低粗糙度加工表面的有效途径。然而此类刀具存在对刀时间过长和易产生切削振动的不足,因此实际应用中多采用具有圆弧切削刃的刀具进行微细车削。

圆弧刃刀具微细车削的切屑流动干涉模型如图 1 所示,可将半径为 r_e 的圆弧刃刀具沿其参与切削的圆弧 \widehat{AB} 分解为一系列的单元刀具, $\Delta s_1, \dots, \Delta s_i, \dots, \Delta s_j, \dots, \Delta s_n$ 。

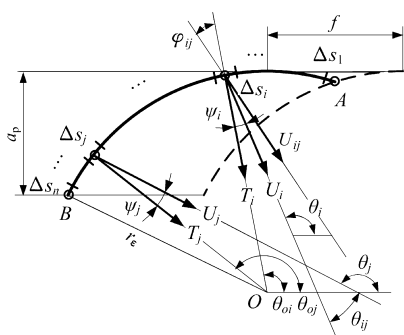


图 1 切屑流动干涉模型

Fig. 1 Chip flow interference model

每一单元刀具的法线方向及其与进给方向之间的夹角分别为 $T_1, \dots, T_i, \dots, T_j, \dots, T_n; \theta_{o1}, \dots, \theta_{oi}, \dots, \theta_{oj}, \dots, \theta_{on}$ 。

在刀具刃倾角的作用下,各单元刀具切削生成的切屑(即单元切屑)的自然流动方向及其与进给方向之间的夹角分别为 $U_1, \dots, U_i, \dots, U_j, \dots, U_n; \theta_1, \dots, \theta_i, \dots, \theta_j, \dots, \theta_n$ 。

根据刀具自然排屑方向与刀具刃倾角之间关系的 Stabler 法则^[1],有

$$\begin{cases} \psi_1 = \lambda_{s1} = \theta_1 - \theta_{o1}, \dots, \psi_i = \lambda_{si} = \theta_i - \theta_{oi} \\ \vdots \\ \psi_j = \lambda_{sj} = \theta_j - \theta_{oj}, \dots, \psi_n = \lambda_{sn} = \theta_n - \theta_{on} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\psi_1, \dots, \psi_i, \dots, \psi_j, \dots, \psi_n$ ——各单元刀具自然排屑方向与刀具法线方向之间的夹角

$\lambda_{s1}, \dots, \lambda_{si}, \dots, \lambda_{sj}, \dots, \lambda_{sn}$ ——各单元刀具的刃倾角

因此,各单元刀具自然排屑方向与进给方向之间的夹角可表示为

$$\begin{cases} \theta_1 = \lambda_{s1} + \theta_{o1}, \dots, \theta_i = \lambda_{si} + \theta_{oi} \\ \vdots \\ \theta_j = \lambda_{sj} + \theta_{oj}, \dots, \theta_n = \lambda_{sn} + \theta_{on} \end{cases} \quad (2)$$

可见,各单元刀具的自然排屑方向各不相同,将产生相互干涉而偏离各自的自然排屑方向。现以单元刀具 Δs_i 与 Δs_j 之间的切屑流动干涉为例,说明圆弧刃参与切削部分引起的切屑流动干涉。

设单元刀具 Δs_i 与 Δs_j 自然排屑方向之间的夹角为 θ_{ij} ,则满足

$$\theta_{ij} = \theta_j - \theta_i = \psi_j - \psi_i + \theta_{oj} - \theta_{oi} \quad (3)$$

受单元刀具 Δs_j 的影响,单元刀具 Δs_i 切削产生的切屑的排出方向 U_{ij} 将偏离其自然排屑方向 U_i ,该偏离角度(称之为干涉角)可表示为

$$\varphi_{ij} = k_{ij} \theta_{ij} \quad (4)$$

式中,干涉角 φ_{ij} 是单元刀具 Δs_i 的自然排屑方向 U_i 与受单元刀具 Δs_j 影响的排屑方向 U_{ij} 之间的夹角; k_{ij} 是单元刀具 Δs_i 和 Δs_j 之间的排屑干涉系数,表示切屑流动方向偏离单元刀具自然排屑方向的程度,其数值介于 $[-1, 1]$ 之间。

受干涉角 φ_{ij} 的影响,单元刀具 Δs_i 处切屑的排出方向 U_{ij} 与其法线方向 T_i 之间的夹角满足

$$\psi_{ij} = \psi_i + \varphi_{ij} = \psi_i + k_{ij} \theta_{ij} \quad (5)$$

同理,其他单元刀具与单元刀具 Δs_i 自然排屑方向之间的夹角分别为 $\theta_{i1}, \dots, \theta_{i(i-1)}, \theta_{i(i+1)}, \dots, \theta_{ij}, \dots, \theta_{in}$ 。

其他单元刀具使单元刀具 Δs_j 偏离自然排屑方向的干涉角分别为 $\varphi_{j1}, \dots, \varphi_{j(i-1)}, \dots, \varphi_{j(i+1)}, \dots, \varphi_{ij}, \dots, \varphi_{jn}$ 。

相应的干涉系数分别为 $k_{i1}, \dots, k_{i(i-1)}, k_{i(i+1)}, \dots, k_{ij}, \dots, k_{in} \in [-1, 1]$ 。

受各单元刀具排屑干涉的影响,单元刀具 Δs_i 处切屑的排出方向与其法线之间的夹角分别满足

$$\begin{cases} \psi_{i1} = \psi_i + \varphi_{i1} = \psi_i + k_{i1} \theta_{i1} \\ \vdots \\ \psi_{i(i-1)} = \psi_i + \varphi_{i(i-1)} = \psi_i + k_{i(i-1)} \theta_{i(i-1)} \\ \psi_{i(i+1)} = \psi_i + \varphi_{i(i+1)} = \psi_i + k_{i(i+1)} \theta_{i(i+1)} \\ \vdots \\ \psi_{in} = \psi_i + \varphi_{in} = \psi_i + k_{in} \theta_{in} \end{cases} \quad (6)$$

由于单元刀具 Δs_i 处的切屑只能随圆弧刃 \widehat{AB} 切削生成的切屑沿某一确定的方向排出,该方向同时也是 $\psi_{i1}, \dots, \psi_{i(i-1)}, \psi_{i(i+1)}, \dots, \psi_{ij}, \dots, \psi_{in}$ 协调后的结果。

1.2 非自由切削的切削力模型

圆弧刃刀具的干涉角模型如图 2 所示。

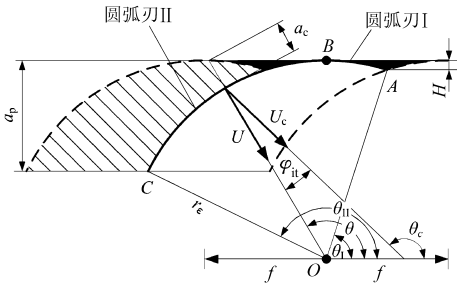


图 2 圆弧刃刀具的干涉角

Fig.2 Chip flow angle of rounded-edge tool

切屑流动方向干涉最直接的作用结果是导致切削力的增加,进而引发一系列不良的加工效应。当切削刃上各点的切削速度变化及前角的差别不大时,非自由切削力 F_{zn} 可以表示为干涉角的函数^[9],即

$$F_{zn} = C_0 (1 + \mu \varphi_{it}^2) a_c^{x_{Fz}} a_w^{y_{Fz}} \quad (7)$$

式中 C_0 ——常数 μ —— φ_{it} 的影响系数
 φ_{it} ——圆弧刃刀具的干涉角
 x_{Fz} ——切削厚度 a_c 对切削力的影响指数
 y_{Fz} ——切削宽度 a_w 对切削力的影响指数,且满足 $y_{Fz} = 1$

干涉角可表示为

$$\varphi_{it} = \theta_c - \theta \quad (8)$$

式中 θ_c ——整体切屑流动的的法线方向与进给方向的夹角

θ ——单元刀具法线方向与进给方向的夹角

圆弧刃 I (\widehat{AB}) 和圆弧刃 II (\widehat{BC}) 上的非自由切削力可表示为各自微分刃切削力 dF_{zn1} 和 dF_{zn2} 的积分,这是实际流屑方向的函数,即满足

$$\begin{aligned} F_{zn1} &= \int_{\theta_1}^{\pi/2} dF_{zn1} = \\ &\int_{\theta_1}^{\pi/2} C_0 [1 + \mu (\theta_c - \theta)^2] (f \cos \theta)^{x_{Fz}} r_e d\theta \quad (9) \\ F_{zn2} &= \int_{\pi/2}^{\theta_{II}} dF_{zn2} = \end{aligned}$$

$$\int_{\pi/2}^{\theta_{II}} C_0 [1 + \mu (\theta_c' - \theta)^2] [f \sin(\theta - \pi/2)]^{x_{Fz}} r_e d\theta \quad (10)$$

式中 r_e ——刀尖圆弧半径 f ——进给量
 θ_1 ——参与切削部分圆弧的起始角
 θ_{II} ——参与切削部分圆弧的终止角
 且满足

$$\theta_1 = \arccos \left(\frac{f}{2r_e} \right) \quad (11)$$

$$\theta_{II} = \frac{\pi}{2} + \arccos \left(\frac{r_e - a_p}{r_e} \right) \quad (12)$$

作用在整个圆弧刃上 \widehat{AC} 的主切削力 F_{zn} 为圆弧刃 I 和圆弧刃 II 上非自由切削力之和,即满足

$$F_{zn} = F_{zn1} + F_{zn2} \quad (13)$$

根据切削过程中的最小能量耗散原理^[6],实际流屑方向的取值应使整把刀具消耗的主切削力 F_{zn} 趋于最小化,即满足

$$\frac{\partial F_{zn}}{\partial \theta_c} = 0 \quad (14)$$

将式(7)~(13)代入式(14),得出图 2 所示非自由切削条件下实际流屑方向与进给方向之间的夹角为

$$\theta_c = \frac{\int_{\theta_1}^{\pi/2} \theta \cos^{x_{Fz}} \theta d\theta - \int_{\pi/2}^{\theta_{II}} \theta \cos^{x_{Fz}} \theta d\theta}{\int_{\theta_1}^{\pi/2} \cos^{x_{Fz}} \theta d\theta - \int_{\pi/2}^{\theta_{II}} \theta \cos^{x_{Fz}} \theta d\theta} \quad (15)$$

1.3 等效切削刃与流屑方向分析

圆弧刃刀具的等效切削刃模型如图 3 所示。

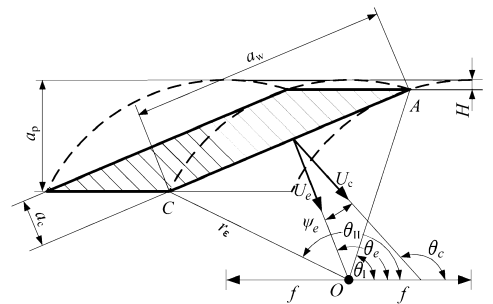


图 3 圆弧刃刀具的等效切削刃

Fig.3 Equivalent cutting edge of rounded-edge tool

将实际参与切削的圆弧的两个端点 A 和 C 的连线定义为圆弧刃 \widehat{AC} 作非自由切削时的等效切削刃^[10],即直线刃 AC 自由切削条件下的排屑方向等同于圆弧刃 I (\widehat{AB}) 与圆弧刃 II (\widehat{BC}) 非自由切削条件下协调后的排屑方向(图 3)。流屑角、等效切削刃法向和实际流屑方向之间的关系可表示为

$$\theta_c = \frac{\theta_1 + \theta_{II}}{2} \quad (16)$$

$$\psi_e = \lambda_{se} = \bar{\theta}_c - \theta_e \quad (17)$$

式中 θ_e ——等效切削刃法线方向与进给方向夹角

ψ_e ——等效切削刃自然排屑方向与法线方向的夹角

λ_{se} ——等效切削刃的刃倾角

1.4 非自由系数的计算模型

非自由系数是用来定量描述切削力的增加所引发的非自由切削程度变化的指标,其含义为

$$C_n = F_{zn}/F_{zf} \quad (18)$$

式中 F_{zn} ——非自由切削的主切削力

F_{zf} ——由切削的主切削力

通过对各微分刃上自由切削力的迭加,得出圆弧刃 I 和圆弧刃 II 作理想自由切削(即不考虑切削干涉)时的切削力,以及整个圆弧刃的主切削力分别为

$$F_{zf1} = \int_{\theta_1}^{\pi/2} C_0 (f \cos \theta)^{x_{Fz}} r_e d\theta \quad (19)$$

$$F_{zf2} = \int_{\pi/2}^{\theta_{II}} C_0 [f \sin(\theta - \pi/2)]^{x_{Fz}} r_e d\theta = \int_{\pi/2}^{\theta_{II}} C_0 (f \cos \theta)^{x_{Fz}} r_e d\theta \quad (20)$$

$$F_{zf} = F_{zf1} + F_{zf2} =$$

$$\int_{\theta_1}^{\pi/2} C_0 r_e (f \cos \theta)^{x_{Fz}} d\theta - \int_{\pi/2}^{\theta_{II}} C_0 r_e (f \cos \theta)^{x_{Fz}} d\theta \quad (21)$$

代入式(18),圆弧刃 I、圆弧刃 II 和整个圆弧刃上的非自由系数分别为

$$C_{n1} = \frac{F_{zn1}}{F_{zf1}} = \frac{\int_{\theta_1}^{\pi/2} [1 + \mu(\bar{\theta}_c - \theta)^2] \cos^{x_{Fz}} \theta d\theta}{\int_{\theta_1}^{\pi/2} \cos^{x_{Fz}} \theta d\theta} \quad (22)$$

$$C_{n2} = \frac{F_{zn2}}{F_{zf2}} = \frac{\int_{\pi/2}^{\theta_{II}} [1 + \mu(\bar{\theta}_c - \theta)^2] \cos^{x_{Fz}} \theta d\theta}{\int_{\pi/2}^{\theta_{II}} \cos^{x_{Fz}} \theta d\theta} \quad (23)$$

$$C_n = \frac{F_{zn}}{F_{zf}} = \frac{\int_{\theta_1}^{\pi/2} [1 + \mu(\bar{\theta}_c - \theta)^2] \cos^{x_{Fz}} \theta d\theta}{\int_{\theta_1}^{\pi/2} \cos^{x_{Fz}} \theta d\theta - \int_{\pi/2}^{\theta_{II}} \cos^{x_{Fz}} \theta d\theta} - \frac{\int_{\pi/2}^{\theta_{II}} [1 + \mu(\bar{\theta}_c - \theta)^2] \cos^{x_{Fz}} \theta d\theta}{\int_{\pi/2}^{\theta_{II}} \cos^{x_{Fz}} \theta d\theta} \quad (24)$$

2 非自由切削参数预报

进给量和切削深度对非自由切削参数预报结果的影响分别如图4和图5所示。

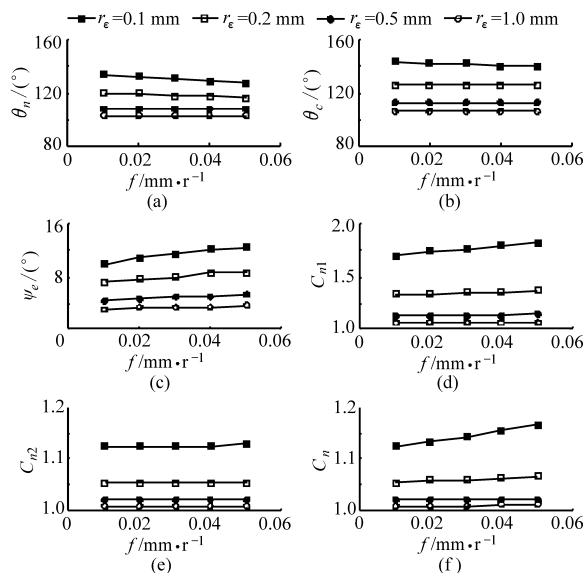


图4 进给量对预报结果的影响

Fig.4 Prediction result vs feed rate

- (a) 等效切削刃法向方向
- (b) 切屑流动方向
- (c) 流屑角
- (d) 非自由系数(圆弧刃 I)
- (e) 非自由系数(圆弧刃 II)
- (f) 非自由系数

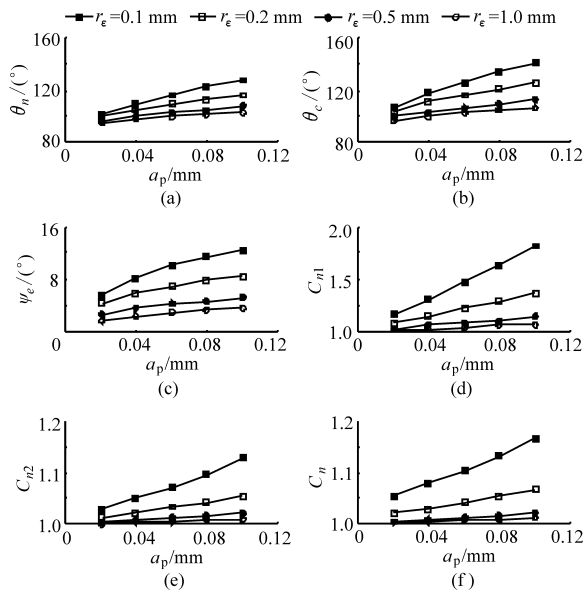


图5 切削深度对预报结果的影响

Fig.5 Prediction result vs cutting depth

- (a) 等效切削刃法向方向
- (b) 切屑流动方向
- (c) 流屑角
- (d) 非自由系数(圆弧刃 I)
- (e) 非自由系数(圆弧刃 II)
- (f) 非自由系数

根据切屑流动干涉和切削力的分析结果,对于刀尖圆弧半径 r_e 确定的圆弧刃刀具,其非自由切削系数主要随切削用量组合 (a_p, f) 的变化而变化。应用文献[9]中给出的非自由切削力的影响系数和指数,即 $\mu = 0.76$ 和 $x_{Fz} = 0.60$,分别改变刀尖圆弧半径和切削用量,根据式(22)~(24)实现了微细切削条件下圆弧刃非自由切削特征参数的预报。

预报结果表明:随着进给量或切削深度的增加,

非自由系数总体呈增加趋势,等效切削刃法线方向和切屑实际流动方向均逐渐向圆弧纵轴线靠拢,但两者之间的夹角即流屑角的变化趋势却不尽相同。进给量增加时,流屑角的增加比较平缓;而切削深度增加时,流屑角增加趋势明显,引发非自由系数的迅速增加,非自由切削与自由切削之间的差异程度显著增强,此时因非自由切削程度的加剧而额外消耗更多的切削能量。

圆弧刃 I 上的非自由系数显著高于圆弧刃 II 和整把刀具的非自由系数。例如在 $r_e = 0.1$ 、 $a_p = 0.04$ mm、 $f = 0.05$ mm/r 的预报条件下,圆弧刃 I 上的非自由系数达到了 1.312(圆弧刃 II 和整把刀具的非自由系数分别为 1.048 和 1.079),切削力比自由切削时增加 31.2%,是整把刀具排屑干涉比较集中的区域,这也是切削表面实际残留高度显著大于理论残留高度的一个重要原因。刀尖圆弧半径越小,非自由系数越大,非自由切削的程度相应越高。采用较大刀尖圆弧半径的刀具在减小切削层残留高度的同时,也有利于减轻切削刃各部分之间干涉和

协调的程度。

3 结论

(1) 针对微细切削条件下刀具圆弧刃区切削干涉作用显著增强的情形,通过单元刀具之间切削干涉对于切屑流动方向的影响分析,建立了一种圆弧刃刀具的排屑方向干涉模型。应用 Stabler 法则和最小能量耗散原理确定出切屑流动方向、等效切削刃法线方向和流屑角。通过与自由切削条件下单元刀具切削合力的对比,得出了圆弧刃刀具作纵向进给的微细切削非自由系数。

(2) 在进给量 $f = 0.01 \sim 0.05$ mm/r、切削深度 $a_p = 0.02 \sim 0.10$ mm 的切削用量范围内对圆弧刃刀具作纵向进给时的等效切削刃、排屑方向、流屑角和非自由系数等非自由切削特征参数进行数值预报。预报结果可用于指导进给量和切削深度等微细切削参数的合理匹配,从而为微细切削非自由状态的评价,以及改善微细切削的不良加工效果提供一种有效方法。

参 考 文 献

- 1 Shaw M C. Metal cutting principles[M]. Oxford: Clarendon Press, 1984.
- 2 Hagiwara M, Chen S, Jawahir I S. A hybrid predictive model and validation for chip flow in contour finish turning operations with coated grooved tools[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(3): 1417 ~ 1427.
- 3 Kimura Y, Takeyama H. Development of a high performance end mill based on the analysis of chip flow generated by curved rake face[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2003, 52(1): 57 ~ 60.
- 4 Kishawy H A, Li L, EL-Wahab A I. Prediction of chip flow direction during machining with self-propelled rotary tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(12 ~ 13): 1680 ~ 1688.
- 5 Shi Hanmin, Wang Xibin, Lu Tao. Non-free cutting and its degree of freedom confinement[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 1999, 121(1): 150 ~ 153.
- 6 师汉民. 金属切削理论及其应用新探[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.
- 7 熊良山, 陈永洁, 师汉民. 排屑速度干涉对切削力影响的试验研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(9): 42 ~ 44.
Xiong Liangshan, Chen Yongjie, Shi Hanmin. Experimental study of the impact of chip-ejection speed interference on cutting forces[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology: Nature Science Edition, 2006, 34(9): 42 ~ 44. (in Chinese)
- 8 王西彬. 非自由切削的流屑角及其分叉[J]. 中国机械工程, 1996, 7(4): 74 ~ 76.
Wang Xibin. Chip flow angle and bifurcation in non-free cutting[J]. China Mechanical Engineering, 1996, 7(4): 74 ~ 76. (in Chinese)
- 9 王西彬, 师汉民, 陆涛. 圆弧刃切削的非自由系数及改善[J]. 工具技术, 1996, 30(4): 13 ~ 16.
Wang Xibin, Shi Hanmin, Lu Tao. Non-free-cutting coefficient of circular edge tools and its improvement [J]. Tool Engineering, 1996, 30(4): 13 ~ 16. (in Chinese)
- 10 刘战强. 基于等效切削刃的切削力预报模型[J]. 山东工业大学学报, 2001, 31(3): 201 ~ 208.
Liu Zhanqiang. A prediction model for cutting force based on equivalent cutting edge[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2001, 31(3): 201 ~ 208. (in Chinese)