

# 快速点磨削周边磨削层模型及参数\*

修世超 蔡光起

(东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110004)

**摘要:** 为深入研究快速点磨削机理及工艺,根据快速点磨削的技术与几何学特征,建立点磨削周边接触层及参数的数学模型,对砂轮和工件的等效速度和直径、磨削参数进行理论分析。在已建立快速点磨削接触层及参数的理论模型基础上,推证计及点磨削变量角度和磨削深度的砂轮周边理论接触宽度的计算公式,并对超薄快速点磨削砂轮周边理论接触宽度和表面粗糙度进行数值仿真。结果表明:与普通外圆磨削不同,砂轮周边与工件实际接触宽度并不恒等于砂轮宽度,点磨削变量角度和磨削深度显著影响砂轮周边的实际接触宽度与工件表面粗糙度数值。

**关键词:** 快速点磨削 砂轮 周边接触宽度 接触层 模型

**中图分类号:** TG580.614

## 0 前言

先进制造技术的发展趋势之一是实现多种高精技术的集成化<sup>[1]</sup>。由德国 Junker 公司开发的快速点磨削集成了数控、CBN 超硬磨料和高速/超高速磨削等先进技术,具有高效率、高柔性的特点,是一种新型磨削加工技术<sup>[2]</sup>,目前已在海外汽车、机床及工具制造业中得到应用。但总体上看,该项技术在海外尚处于起步发展阶段,特别是对点磨削机理、磨削质量控制等方面的研究及相关技术信息鲜见报道。国内虽有少数汽车制造企业针对特定零件的加工全套引进了这一工艺及设备,但由于不掌握其核心技术及理论,不能进行工艺开发,应用范围有限。因此开展对此项技术的研发具有重要的理论和工程意义。

磨削加工接触层参数对磨削过程影响显著<sup>[3-4]</sup>。快速点磨削采用薄层(4~6 mm)超硬磨料砂轮和 100 m/s 以上的砂轮速度,由多坐标联动实现表面成形运动。磨削中通过在水平和垂直两个方向上轴线倾斜的砂轮与回转形工件形成理论上的点接触,因此接触区形态特别是周边接触区不同于常规外圆磨削,属于一种新的接触区模型。文献[3,5]在对磨削方式的论述中给出了角度磨削及螺旋槽磨削的等效动态接触弧长度、等效直径和未变形切屑厚度等接触层参数的计算模型,但对周边接触层的进一步研究仍按常规磨削方式,而加工表面的几何创成模型取决于周边接触层参数<sup>[6-7]</sup>。由于存在点磨变量角

度,点磨削薄层砂轮的侧边和周边的磨削作用不同,表现在以下几方面:① 材料去除主要由砂轮侧边完成,实现材料去除率指标。② 由于沿工件表面母线方向砂轮周边切深逐渐减小,因此砂轮周边起精加工和光磨作用,以实现最终的表面完整性指标。由此可见,点磨削机理、砂轮磨损特性等与常规磨削方式区别很大,常规的外圆磨削层模型已不再适用于快速点磨削过程。要深入研究快速点磨削机理,必须分别建立砂轮侧边和周边接触区的磨削层模型与参数。快速点磨削的变量角度将显著影响接触区形状、面积和方位,因而也将影响磨削力、磨削热、砂轮磨损表现及工件表面完整性指标<sup>[5-7]</sup>。

## 1 砂轮周边磨削层参数及模型

在磨削过程中,磨粒作为切削的最小单元,以高速运动和本身的形状与工件相互干涉,其结果是被切除的工件材料形成分离的切屑,干涉的痕迹则留在工件表面上,形成了微观不平的表面轮廓。因此磨削层参数及切屑的尺寸对研究和控制磨削过程具有以下重要的意义。

(1) 磨削层参数决定磨粒上所受的力,因此也就决定着结合剂把持和固定磨粒所需的结合力。

(2) 在磨削过程中,当切屑厚度变小时,比磨削能增加,因而影响磨除率和磨削区温度。

(3) 磨削层参数影响参与切削的磨刃数量,切屑去除后,最终留在磨削表面上的磨粒划痕的集合决定工件表面完整性指标。

(4) 磨粒上径向力随接触面积的增加而增加,因此影响砂轮的磨损表现及加工精度。

\* 教育部科学技术研究重点资助项目(104190)。20051112 收到初稿,20060710 收到修改稿

### 1.1 快速点磨削过程的几何学特征

点磨削回转表面时, 由于在垂直和水平两个方向分别存在点磨削变量角度  $\alpha$  与  $\beta$ , 砂轮和工件轴线在空间成交错状态(图 1)。由于点磨削砂轮轴线与工件轴线并不平行, 因而砂轮周边磨削层几何参数与普通外圆磨削不同, 磨削层及其参数分析应在垂直于生成表面且包含磨削区内砂轮圆周速度方向的投影面内进行, 并估计等效直径<sup>[3]</sup>。砂轮有效磨削深度是其垂直于生成表面的分量, 工件等效速度是和砂轮速度共线的速度分量。

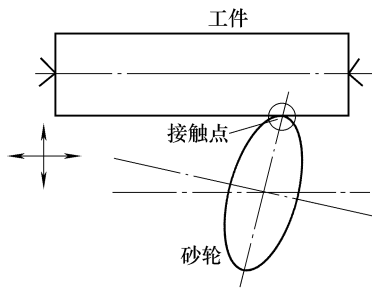


图 1 快速点磨削原理

### 1.2 砂轮与工件的等效直径和速度

为便于分析, 现分别在两个点磨削变量角度方向加以讨论。

(1) 考虑切向(垂直)变量角度的等效直径和速度。假定砂轮轴线与工件轴线在切向(垂直)方向的夹角为  $\pm\alpha$  (一般取  $\pm 0.5^\circ \sim 6^\circ$ ), 正负号主要由砂轮纵向进给方向来定。此时, 在接触点处工件速度  $v_w$  与砂轮速度  $v_s$  方向不同, 过接触点  $C$  做垂直于砂轮轴线的断面, 如图 2 所示。如果砂轮直径为  $d_s$ , 工件直径为  $d_w$ , 则  $A-A$  断面内, 由工件在  $C$  点的曲率半径  $\rho_1$  即可得出工件在该平面上的等效直径

$$d_{w,e} = 2\rho_1 = \frac{d_w}{\cos^2 \alpha} \quad (1)$$

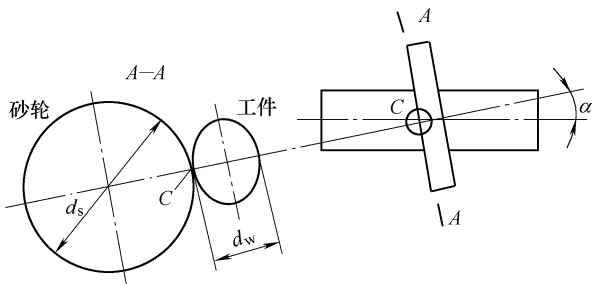


图 2 与点磨变量角  $\alpha$  相关的等效直径

工件等效圆周速度是与砂轮速度  $v_s$  方向一致的分量

$$v_{w,e} = v_w \cos \alpha \quad (2)$$

(2) 考虑横向(水平)变量角度的等效直径和速度。快速点磨削过程中, 根据被加工表面的曲率大小和轴肩的尺寸及方位, 砂轮轴线与通过工件轴线

的垂直平面的夹角  $\beta$  一般在  $0 \sim 30^\circ$  范围内变化, 并由 CNC 控制。如果暂不考虑  $\alpha$  角度的影响, 接触点  $C$  处工件速度  $v_w$  与砂轮速度  $v_s$  共线。因此过  $C$  点做垂直于工件轴线的断面  $B-B$ , 如图 3 所示, 由砂轮在接触点  $C$  处的曲率半径  $\rho_2$  就可以求得在该平面上砂轮的等效直径  $d_{s,e}$  以及等效径向切深  $a_e$

$$d_{s,e} = 2\rho_2 = d_s \cos \beta \quad (3)$$

$$a_e = a \cos \beta \quad (4)$$

式中  $a$  —— 沿砂轮径向磨削深度

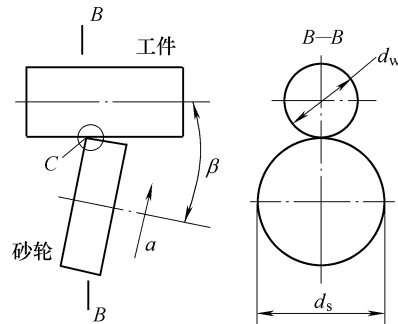


图 3 与点磨变量角  $\beta$  相关的等效直径

### 1.3 快速点磨削的当量直径

根据第 1.2 节中对砂轮与工件等效直径和速度的解析, 快速点磨削过程中, 当点磨变量角  $\alpha$  和  $\beta$  均不为零时, 如图 1 所示, 在包含砂轮速度并垂直于工件轴线所在的铅垂面的平面内, 工件与砂轮的等效直径和等效速度分别为

$$\begin{cases} d_{w,e} = \frac{d_w}{\cos^2 \alpha} \\ d_{s,e} = d_s \cos \beta \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} v_{w,e} = v_w \cos \alpha \\ v_{s,e} = v_s \end{cases} \quad (6)$$

式中  $d_{s,e}, d_{w,e}$  —— 砂轮和工件的等效直径

$v_{s,e}, v_{w,e}$  —— 砂轮和工件的等效速度

折算成平面磨削的砂轮当量直径为

$$d_e = \frac{d_{s,e} d_{w,e}}{d_{w,e} + d_{s,e}} = \frac{d_s d_w \cos \beta}{d_s \cos \beta \cos^2 \alpha + d_w} \quad (7)$$

### 1.4 周边动态接触弧长和单颗磨粒最大切削深度

一般内外圆磨削  $v_w/v_s=0.02 \sim 0.01$ ; 平面磨削  $v_w/v_s=0.01 \sim 0.005$ ; 而快速点磨削  $v_w/v_s=0.04 \sim 0.4$ , 可见工件速度对动态接触弧长的影响不能忽略。根据磨削几何学关系<sup>[3-4]</sup>, 快速点磨削周边动态接触弧长可表示为

$$l = \left( 1 + \frac{v_{w,e}}{v_s} \right) (a_e d_e)^{\frac{1}{2}} = \left( 1 + \frac{v_w \cos \alpha}{v_s} \right) (a \cos \beta d_e)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

当考虑纵向进给时，砂轮与工件的动态接触弧长和单颗磨粒最大切削深度分别为

$$l = \left[ \left( 1 + \frac{v_{w,e}}{v_s} \right)^2 + \left( \frac{f_a n_w \cos \alpha}{60 v_s} \right)^2 \right]^{1/2} (a \cos \beta d_e)^{1/2} \quad (9)$$

$$a_g = 2\lambda \frac{v_{w,e}}{v_s} \sqrt{\frac{a_e}{d_e}} = 2\lambda \frac{v_w \cos \alpha}{v_s} \sqrt{\frac{a \cos \beta}{d_e}} \quad (10)$$

式中  $f_a$  —— 轴向进给量(mm/r)  
 $n_w$  —— 工件转速(r/min)  
 $\lambda$  —— 连续切刃间距(mm)

## 2 点磨削砂轮周边接触宽度计算

### 2.1 砂轮周边接触宽度计算模型

快速点磨削对零件的光整加工过程主要由砂轮周边完成，因此周边接触区接触宽度数值对工件表面粗糙度数值影响很大<sup>[4-7]</sup>。砂轮与工件的接触宽度值越大，接触区工件表面磨粒干涉次数越多，表面粗糙度数值就越小。由于快速点磨削的磨削深度很小，而且存在点磨变量角度，周边实际接触宽度往往不等于砂轮宽度，而是点磨削变量角度和磨削深度的函数。如果像普通外圆磨削一样，用砂轮宽度作为实际接触宽度，将会影响工件表面完整性特别是表面粗糙度的分析和预测结果。因此，这里引入快速点磨削周边接触宽度参数。根据点磨削原理，当砂轮径向磨削深度为  $a$ ，切向与横向变量角度分别为  $\alpha$  和  $\beta$  时，如果用  $\theta$  表示  $\beta$  角在工件端面的投影，则两角度的空间几何关系根据图 4a 可表示成

$$\sin \alpha \tan \theta = \tan \beta \quad (11)$$

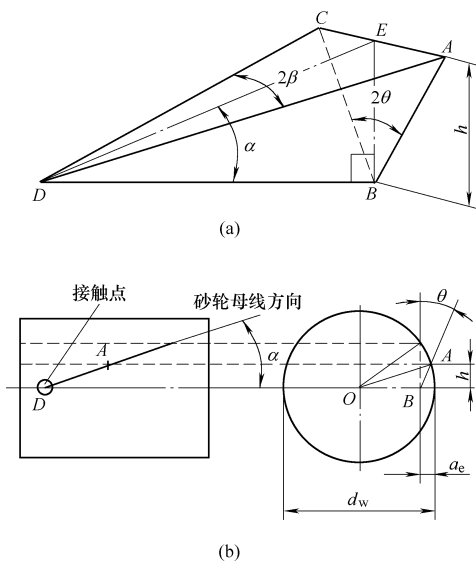


图4 砂轮周边与工件的理论接触宽度

式(11)中，如果  $\alpha$  恒不为零，则当  $\beta$  为零时， $\theta$  亦为零。根据图 4 工件表面与砂轮周边理论接触宽度推导如下：在  $\triangle OAB$  中，根据余弦定理， $A$ 、 $B$  两点间线段长度为

$$L_{AB} = \frac{1}{2} \left[ (2a_e - d_w) \sin \theta + \sqrt{(d_w - 2a_e)^2 \sin^2 \theta - 4a_e^2 + 4a_e d_w} \right]$$

$$h = L_{AB} \cos \theta = \frac{1}{2} \times$$

$\left[ \left( a_e - \frac{d_w}{2} \right) \sin 2\theta + \cos \theta \sqrt{d_w^2 - \cos^2 \theta (d_w - 2a_e)^2} \right]$   
 在空间砂轮周边与工件表面理论接触宽度的一般表达式应为

$$b = L_{AD} = \frac{h}{\sin \alpha \cos \beta} = \frac{1}{2 \sin \alpha \cos \beta} \times \left[ \left( a_e - \frac{d_w}{2} \right) \sin 2\theta + \cos \theta \sqrt{d_w^2 - \cos^2 \theta (d_w - 2a_e)^2} \right] \quad (12)$$

式中  $L_{AD}$  ——  $A$ 、 $D$  两点间线段长度  
 点磨削圆柱表面时， $\beta$  一般为零。将式(4)代入式(12)，并令  $\beta = 0$ ，得到点磨削圆柱表面周边接触区理论接触宽度为

$$b = \frac{1}{\sin \alpha} \times \sqrt{\left( \frac{d_w}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_w}{2} - a \right)^2} = \frac{1}{\sin \alpha} \sqrt{a(d_w - a)} \quad (13)$$

如果砂轮宽度为  $b_s$ ，则快速点磨削周边实际接触宽度  $b_r$  为

$$b_r = \begin{cases} b_s & b_s \leq b \\ b & b_s > b \end{cases} \quad (14)$$

可见砂轮周边与工件实际接触宽度并不一定等于砂轮宽度，且与砂轮直径无关。

### 2.2 计算实例

在点磨削圆柱表面时，图 5 给出了砂轮周边理论接触宽度  $b$  随磨削深度  $a$  变化的仿真结果。其加工条件为：工件直径  $d_w = 40 \text{ mm}$ ，砂轮宽度  $b_s = 6 \text{ mm}$ ，横向点磨削变量角  $\beta = 0^\circ$ ，切向点磨削变量角  $\alpha = +5^\circ$ 。图 6 则为接触宽度  $b$  随切向变量角  $\alpha$  变化的仿真曲线，其加工条件为：工件直径  $d_w = 40 \text{ mm}$ ，砂轮宽度  $b_s = 6 \text{ mm}$ ， $\beta = 0^\circ$ ，磨削深度  $a = 0.01 \text{ mm}$ 。

从图 5、6 中可以看出，周边理论接触宽度  $b$  随磨削深度  $a$  增加而增加，随点磨变量角度  $\alpha$  增加而减小。根据式(14)，如果砂轮宽度小于或等于理论接触宽度，则实际接触宽度等于砂轮宽度。因此，在给定条件下，图 5、6 中的虚线(即  $b = b_s$  线)表示周边实际接触宽度极限。由此可见，改变磨削深度和

点磨削变量角度数值,在实际接触宽度极限范围内,可控制快速点磨削砂轮周边与工件的接触宽度大小。

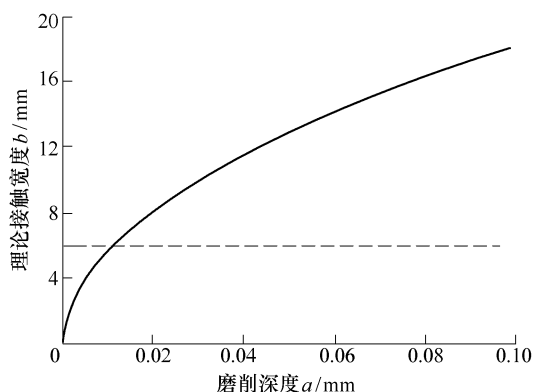


图5 磨削深度对接触宽度的影响

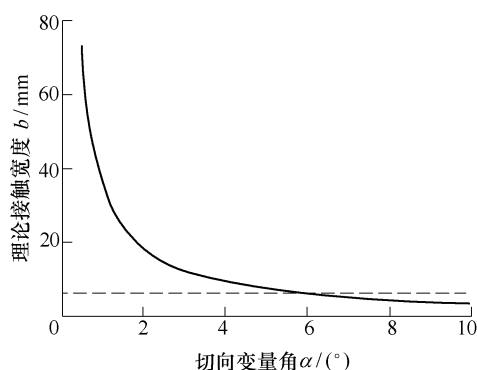


图6 切向变量角度对接触宽度的影响

### 3 点磨削加工表面粗糙度数值仿真

由于周边接触宽度的大小将影响磨削加工表面粗糙度数值,根据文献[6]中所建立的磨削加工表面粗糙度计算模型,并在磨削参数  $G$  中计及点磨削变量角度  $\alpha$  和  $\beta$ , 表为

$$G = \frac{v_w \cos \alpha}{v_s} \sqrt{\frac{d_w + d_s \cos \beta \cos^2 \alpha}{d_s d_w \cos \beta}}$$

用式(14)表示的实际接触宽度  $b_r$  取代原式中砂轮宽度  $b_s$ , 图7给出了点磨削加工的表面粗糙度数值仿真结果。加工条件: 点磨削外圆表面,  $b_s=6$  mm,  $d_s=370$  mm,  $d_w=40$  mm,  $v_s=100$  mm/s, CBN 砂轮粒度 80/100,  $\beta=0^\circ$ ,  $v_w=4$  m/s, 纵向进给量  $f=0.006$  mm/r, 工件材料为 45 钢, 塑性系数  $K=1.3$ 。

从图7中可以看出: 切向点磨变量角  $\alpha$  和磨削深度  $a$  主要通过接触宽度影响表面粗糙度数值。 $\alpha$  增加, 砂轮实际接触宽度减小, 使在给定纵向进给量时接触区工件表面磨削干涉次数也减少, 因而表面

粗糙度数值增大。 $\alpha$  角在一定的变化范围内, 磨削深度  $a$  增大, 实际接触宽度增大, 表面粗糙度数值降低, 当  $a$  达到一定数值后, 实际接触宽度等于砂轮宽度而达到最大, 此后表面粗糙度数值变化不大。

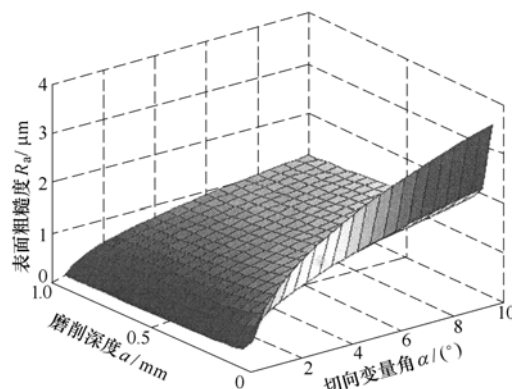


图7 点磨削加工表面粗糙度仿真结果

### 4 结论

(1) 快速点磨削的磨削层模型不同于普通外圆磨削, 磨削区存在侧边和周边两个接触区。砂轮侧边以去除材料为主; 而周边作用是精加工和光磨工件, 以实现最终的表面粗糙度指标。

(2) 根据点磨削几何学关系, 研究建立了快速点磨削砂轮周边磨削层及参数模型; 砂轮和工件的等效直径与速度、周边动态接触弧长和未变形切屑厚度等参数都与点磨变量角度相关。

(3) 快速点磨削周边实际接触宽度并不恒等于砂轮宽度, 而与点磨变量角度和磨削深度有关; 当理论接触宽度大于或等于砂轮宽度时, 周边实际接触宽度等于砂轮宽度, 除此之外, 实际接触宽度即为理论接触宽度。接触宽度的变化将影响工件表面粗糙度数值。

### 参 考 文 献

- [1] 杨叔子, 吴波. 先进制造技术及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 73-78.
- [2] XIU S C, LI Q, CAI G Q. Key technology and mechanism of CNC quick-point grinding[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 12(sup): 43-46.
- [3] MALKIN S. 磨削技术理论与应用[M]. 蔡光起等, 译. 沈阳: 东北大学出版社, 2002.
- [4] 任敬心, 华定安. 磨削原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1988.
- [5] KIM J W, GUPTA H. High speed grinding: Evaluation of wheel performance and surface integrity[J]. Journal of Ma-

terials Processing and Manufacturing Science, 1996, 5(2): 115-126.

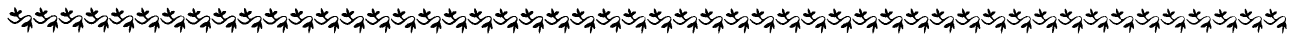
- [6] 修世超, 李长河, 蔡光起. 磨削加工表面粗糙度理论模型修正方法[J]. 东北大学学报, 2005, 26(8): 770-773.
- [7] 白井英治. 切削磨削加工学[M]. 高希正等, 译. 北京: 机械工业出版社, 1982.

## EDGE GRINDING LAYER MODEL AND PARAMETERS IN QUICK-POINT GRINDING

XIU Shichao CAI Guangqi

(School of Mechanical Engineering & Automation,  
Northeastern University, Shenyang 110004)

**Abstract:** For studying and analyzing the mechanism and process of quick-point grinding deeply, the models and the parameters of the edge contact layer in the process are established based on the technical and geometrical characteristics of quick-point grinding. The equivalent speeds and diameters of the wheel and workpiece as well as the grinding parameters are



(上接第196页)

**Abstract:** For the purpose of multi-axis flank machining of impellers, a new method for 5-axis flank machining sculptured surfaces with a drum-taper type cutter based on the signed Dupin indicatrix is presented. As to the cutter with the strictly convex cutting surface, the necessary and sufficient condition for gouge-free 5-axis surface flank machining is proposed, which is that the signed Dupin indicatrix of the cutter is contained in the indicatrix of the part surface at the cutting contact point. Moreover, the implementation of gouging detection and correction using the drum-taper type cutter is detailed in the context. For a given scallop height, the paper also provides an approach to calculate the machining strip width. Hereby, the

analyzed in theory. On the basis of the works above, a formula considering the point grinding angles and the depth of cut is theoretically deduced to calculate the contact width in wheel edge, and numerical simulations are performed for the edge contact width of an ultra-thin grinding wheel and ground surface roughness in quick-point grinding. It is shown that the edge contact width is not always equal to the thickness of the wheel like conventional cylindrical grinding process, the point grinding angles and the depth of cut influence the edge contact width and surface roughness evidently in quick-point grinding process.

**Key words:** Quick-point grinding Grinding wheel

Edge contact width Contact layer Model

**作者简介:** 修世超, 男, 1958年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为数字化设计与制造、现代磨削加工技术及理论。

E-mail: 163xsc@163.com

蔡光起, 男, 1947年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为高效精密磨粒加工、工业机器人技术及理论。

E-mail: gqcai@ln139.com.cn

tool path generation procedure with the iso-scallop method is discussed for 5-axis flank milling sculptured surfaces. The test result shows that the machining efficiency of flank milling using drum-taper type cutter is improved by 37.44% comparing with ball end milling at the same scallop height. It suggests that flank machining is an effective means for improving machining efficiency and quality.

**Key words:** Signed Dupin indicatrix Flank machining

Drum-taper type cutter Scallop height

**作者简介:** 吴宝海, 男, 1975年出生, 博士。主要研究方向为复杂曲面的计算机辅助几何设计及多坐标数控加工理论。

E-mail: wubaohai@nwpu.edu.cn