

# 基于遗传算法的二并联机床钻尖刃磨参数优化

金明日<sup>1,2</sup>, 邹平<sup>1</sup>, 吴昊<sup>1</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 金策工业综合大学 机械科技学院, 朝鲜 平壤 999093)

**摘要:** 以螺旋面钻尖刃磨为研究对象, 基于二并联机床优化磨削参数, 为实现所需的几何参数螺旋面钻尖刃磨提供理论与实验基础. 介绍了基于二并联机床的渐开螺旋面刃磨方法, 针对螺旋面钻尖后刀面推导了数学模型. 分析了二并联机床的磨削参数与螺旋面钻尖几何参数的关系, 然后用遗传算法得出螺旋面钻尖刃磨参数优化解. 在二并联机床上进行刃磨实验, 结果表明, 采用本文的优化刃磨参数提高了刃磨精度, 并验证用二并联机床可以刃磨出满足用户几何参数要求的螺旋面钻尖.

**关键词:** 渐开螺旋面刃磨法; 二并联机床; 麻花钻; 遗传算法; 钻尖刃磨

**中图分类号:** TH 113      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2016)01-0133-05

## Optimization of Grinding Parameters for Drill Points with a Biglide Parallel Machine Based on Genetic Algorithm

KIM Myong-il<sup>1,2</sup>, ZOU Ping<sup>1</sup>, WU Hao<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mechanical Science & Technology, Kimchaek University of Technology, Pyongyang 999093, DPR of Korea. Corresponding author: ZOU Ping, E-mail: pzou@me.neu.edu.cn)

**Abstract:** In view of helical drill point grinding, the theoretical and experimental bases for grinding the required geometrical parameters of helical drill points are presented in this paper based on the optimization of biglide parallel machine grinding parameters. A method of grinding the involute helical surface based on the biglide parallel machine is introduced, and then the mathematical model is derived for the helical drill flank. Moreover, the relationship between the geometric parameters and grinding parameters is analyzed, and the optimal grinding parameters are acquired based on genetic algorithm. The results showed that the optimized grinding parameters improve the grinding precision with the experiment on the biglide parallel machine, and the biglide parallel machine can satisfy clients' demands of drill grinding.

**Key words:** grinding method of involute helical surface; biglide parallel machine; twist drill; genetic algorithm; grinding of drill points

钻孔是常用的材料去除加工工艺之一, 随着汽车工业和航空工业的发展, 对孔加工数量的需求和质量的要求大幅度上升, 因而钻孔正变得越来越复杂且要求更高. 尽管对孔加工的要求显著增加, 但是在钻孔和钻头制造过程中, 钻尖的几何形状、磨削工艺参数和过程力学等之间的关系仍在研究<sup>[1-6]</sup>. 钻头的几何形状比大多数刀具更复杂, 如何对它进行刃磨, 对于提高钻孔的效率、孔的加工质量、钻头的使用寿命十分重要<sup>[1]</sup>. 螺旋

面钻尖的刃磨是沿后刀面进行的, 刃磨时应该满足主切削刃上各点的后角由外缘转点向钻心方向逐渐增大, 并要求有适当的横刃斜角和横刃前、后角<sup>[1-5]</sup>. 螺旋面钻尖后刀面对钻头设计非常重要, 它的几何参数(后角、半顶角、横刃斜角等)对于切削力、钻削温度和钻头耐用度的影响较大, 而且针对不同工件材料和不同切削条件有相应的最佳几何参数. 因此, 对钻头后刀面刃磨特性进行具体研究, 刃磨出高精度钻头后刀面具有重要意义.

收稿日期: 2014-11-04

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(20102067).

作者简介: 金明日(1979-), 男, 朝鲜人, 东北大学博士研究生, 金策工业综合大学讲师; 邹平(1963-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

文献[2-3,6]对螺旋面钻头提出的模型是基于钻头的几何参数的,而不是基于刃磨参数的.有些文献中提出了几种基于刃磨参数的螺旋面钻尖数学模型<sup>[4,7-8]</sup>,然而,所提出的方法只限于特定的多轴数控刀具磨床并且其控制系统比较复杂、成本高,该数学模型不适用于二并联机床的钻头磨削.

本文在机械结构相对简单的二并联机床床上进行了基于刃磨参数的螺旋面钻尖数学模型推导,描述了钻尖的几何形状和刃磨参数之间的关系.利用遗传算法得出优化刃磨参数,根据所求得的钻尖几何形状,获得了刃磨出高精度螺旋面钻头后刀面的理论依据.

## 1 螺旋面钻尖后刀面的数学模型

### 1.1 渐开螺旋面钻尖后角刃磨原理

渐开螺旋面刃磨的原理如图 1 所示.

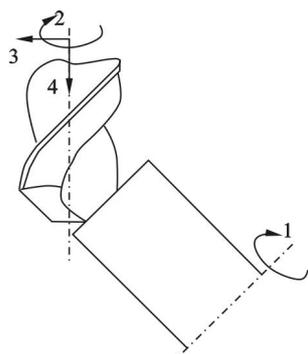


图 1 渐开螺旋面刃磨法示意图

Fig. 1 Explanatory view of grinding involute helical surface

1—砂轮自转运动;2—麻花钻自转运动;3—麻花钻沿垂直轴线方向的运动;4—麻花钻沿轴线方向的进给运动.

本文的二并联机床结构如图 2 所示:工作平台由蜗轮蜗杆转动副在电机的驱动下上下运动;两个滑块作直线运动,由直线电机直接驱动丝杠实现.

平动机构并联杆杆长固定,并与运动平台及滑块间通过转动副连接.通过并联杆的驱动,运动平台整体可以实现横向和铅直方向运动,而在纵向上,其运动与并联杆无关.运动平台在空间内的三维平移正好满足刃磨所需的运动.

用二并联机床的螺旋面钻尖刃磨坐标系如图 3 所示.如图 1 所示的麻花钻沿轴线方向进给运动 4 和麻花钻沿垂直轴线方向运动 3 的合成由并联杆驱动运动平台实现, $\omega$  表示钻头绕自身轴线的角速度, $\theta$  表示钻头轴线与砂轮轴线夹角, $\omega_0$  表

示砂轮旋转角速度.

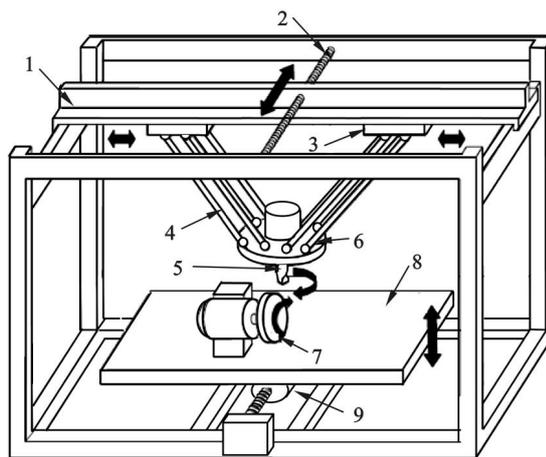


图 2 二并联机床结构图

Fig. 2 Structure chart of biglide parallel machine

1—滑动拖板;2—滚珠丝杆;3—滑块;4—杆;5—钻头;6—运动平台;7—砂轮;8—工作平台;9—蜗轮蜗杆传动.

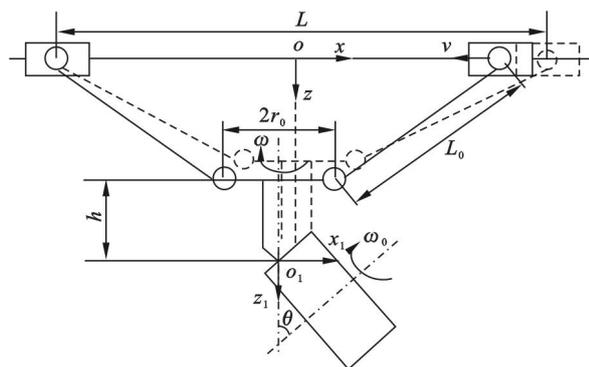


图 3 刃磨坐标系

Fig. 3 Coordinate system of grinding

根据图 3,很容易求出钻尖坐标系  $o_1(x_1, y_1, z_1)$  和机床结构坐标系  $o(x, y, z)$  的关系方程:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{vt}{2} \\ 0 \\ \sqrt{L_0^2 - (\frac{L-vt}{2} - r_0)^2} + h \end{bmatrix}. \quad (1)$$

通过式(1)可以看出:刃磨中钻头的运动具有  $z$  轴方向加速度,其路径近似弧线.但是,根据计算,其加速度值非常小( $0.008 \text{ mm/s}^2$  左右),而研磨时间很短(最长 2 s),因此,其运动可被视为线性运动.

### 1.2 螺旋面钻尖后刀面的数学模型

如果求出钻尖坐标系下后刀面上任意一点的参数方程,就可以求出在机床坐标系下钻尖后刀面的模型.

根据图 4 所示的几何关系,可以得到在钻尖坐标系下,后刀面任意一点的参数方程为

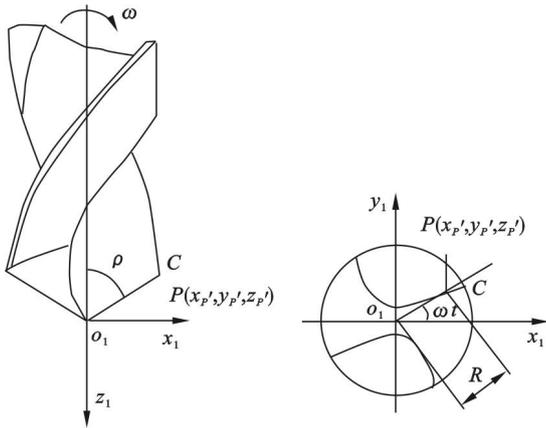


图 4 钻头上 P 点示意图  
Fig. 4 Schematic figure of point P on drill

$$\left. \begin{aligned} x_p' &= R \cos \omega t, \\ y_p' &= R \sin \omega t, \\ z_p' &= -R / \tan \rho. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中： $\omega$  表示钻头的自转角速度； $R$  表示主刃上任意一点  $P$  到钻头轴线的距离； $\rho$  表示钻头的初始半顶角。

因此后刀面一点  $P$  在机床机构坐标系中的方程为

$$\left. \begin{aligned} x &= R \cos \omega t - \frac{vt}{2}, \\ y &= R \sin \omega t, \\ z &= -\frac{R}{\tan \rho} + \sqrt{L_0^2 - \left(\frac{L-vt}{2} - r_0\right)^2} + h. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

## 2 钻尖几何结构参数与刃磨参数的关系方程

### 2.1 钻尖结构圆周后角 $\alpha_{fc}$

钻尖的结构圆周后角  $\alpha_{fc}$  通常取外缘转点  $C$  处的结构圆周后角。

首先进行主刃上任意点结构圆周后角的求解,其定义为:在过主刃上任意点  $A$  且与钻头轴线同轴的圆柱面的切平面内,钻头端面与该点处后刀面所成的锐角,如图 5 所示。

由于测量平面  $I-I$  与钻头半径垂直,所以要把在坐标系  $o_2(x_2y_2z_2)$  下度量的后角转换到钻头结构坐标系  $o_1(x_1y_1z_1)$  下。主刃上任意点  $A$  的坐标系为

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_A & \sin \delta_A & 0 \\ -\sin \delta_A & \cos \delta_A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

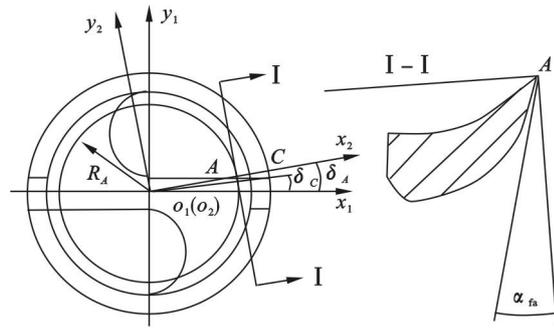


图 5 结构圆周后角示意图  
Fig. 5 Schematic figure of circumference relief angle

把式(3)代入式(4)中,主切削刃上任意点  $A$  处的后角可以表示为

$$\tan \alpha_{fa} = \left[ \frac{dz_2}{dy_2} \right]_A = \frac{\frac{dz}{dt}}{-\frac{dx}{dt} \sin \delta_A + \frac{dy}{dt} \cos \delta_A} \quad (5)$$

根据式(5),钻尖后角与刃磨参数的关系方程如下:

$$\tan \alpha_{fc} = \frac{\frac{v}{2} \left( \frac{L}{2} - r_0 \right)}{\left( \omega R_c \cos \delta_c - \frac{v}{2} \sin \delta_c \right) \sqrt{L_0^2 - \left( \frac{L}{2} - r_0 \right)^2}} \quad (6)$$

### 2.2 钻尖半顶角 $\rho$

钻尖刃磨顶角为外缘转点  $C$  处的半顶角, $C$  点切线的斜率可以表示为

$$\tan \rho = \left[ \frac{dx}{dz} \right]_C \quad (7)$$

刃磨时要求钻头轴线和砂轮轴线保持一定的角度  $\theta$ ,因此  $\theta$  就是所要求的半顶角。

$$\rho = \theta \quad (8)$$

### 2.3 钻尖横刃斜角 $\psi$

横刃斜角  $\psi$  是在主剖面内测量的钻尖后刀面与基面的夹角。根据图 6,横刃斜角  $\psi$  的正切值可表示为如下形式:

$$\tan \psi = \left[ \frac{dy_1}{dx_1} \right]_{o_1} \quad (9)$$

由螺旋面钻尖的结构特点决定,实际刃磨中钻尖与砂轮的交曲线不在  $x_1$  轴和  $y_1$  轴反而在  $M$  点。于是,刃磨时  $M$  点的轨道就是螺旋面钻尖横刃的轮廓。横刃在  $x_1 - y_1$  平面内的投影曲线方程为

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{vt}{2} + r_M \cos(\omega t + \varphi), \\ y_1 &= r_M \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中: $x_M$  和  $y_M$  为  $M$  点在钻尖坐标系  $o_1(x_1y_1)$  的

坐标值;  $x_M = r_M \cos\varphi, y_M = r_M \sin\varphi$ .

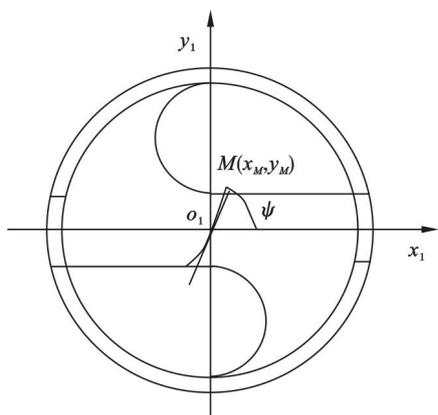


图 6 横刃斜角示意图

Fig. 6 Schematic figure of chisel edge angle

将式(10)代入式(9)即可得到横刃斜角关于刃磨参数的表达式,其结果为

$$\tan\psi = \frac{2\omega r_M}{v} \quad (11)$$

### 3 基于遗传算法的刃磨参数优化

在改善钻头加工性能的实际刃磨中,为得到适当的刃磨参数,刃磨出满足所需钻头的几何参数十分重要.如式(6),式(8),式(11),螺旋面钻头最常见的3个几何参数取决于几个参数,如  $L, L_0, r_M, r_0, R_c, v, \omega$  和  $\theta$  等.因此,一种有效的方法是使用优化技术来得到磨削参数,为用户定制钻头.

本文利用遗传算法进行刃磨参数优化,其过程中把  $L, v$  和  $\omega$  定为变量.

目标函数如下:

$$F(\mathbf{X}) = \eta_\alpha |\alpha_{fc} - \alpha_0| + \eta_\psi |\psi - \psi_0| \quad (12)$$

式中:  $\alpha_0$  和  $\psi_0$  分别表示所需的或者用户要求的钻头结构圆周后角与横刃斜角;  $\eta_\alpha$  与  $\eta_\psi$  分别表示后角及横刃斜角的权重系数,  $\eta_\alpha + \eta_\psi = 1$ .

这个优化问题在数学上表示如下:

目标函数:  $F(\mathbf{X}) \rightarrow \min$ .

变量  $\mathbf{X} = [L \quad v \quad \omega]^T$ ,

约束条件  $g_1: 400 \text{ mm} < L < 1100 \text{ mm}$ ,

$g_2: 0 < v < 20 \text{ mm/s}$ ,

$g_3: 0 < \omega < 15 \text{ rad/s}$ .

为了验证所提出的优化方法,先用该方法得出为磨削不同几何参数钻头的最佳刃磨参数,然后用其刃磨参数在二并联机床进行钻头刃磨,最后通过对钻头几何参数的测量进行了比较分析.

在该优化问题中使用的参数见表 1,  $L_0 = 500 \text{ mm}$ ,  $r_0 = 65 \text{ mm}$ .

表 1 优化计算中使用的各种参数值  
Table 1 Parameters used in calculation

序号	$R_c/\text{mm}$	$\alpha_0/(\text{^\circ})$	$\psi_0/(\text{^\circ})$	$\theta/(\text{^\circ})$	$r_M/\text{mm}$
1	3	30	55	60	0.64
2	3	15	40	60	0.82
3	5	30	35	60	1.39
4	5	15	50	60	1.04

使用 MATLAB 遗传算法(GA)工具箱对表 1 中的 4 组钻尖结构参数进行优化,对应的目标函数收敛过程如图 7 所示.优化计算中选取的种群大小均是 200 个,在 51 ~ 53 代演化后产生最优解,结果如表 2 所示.

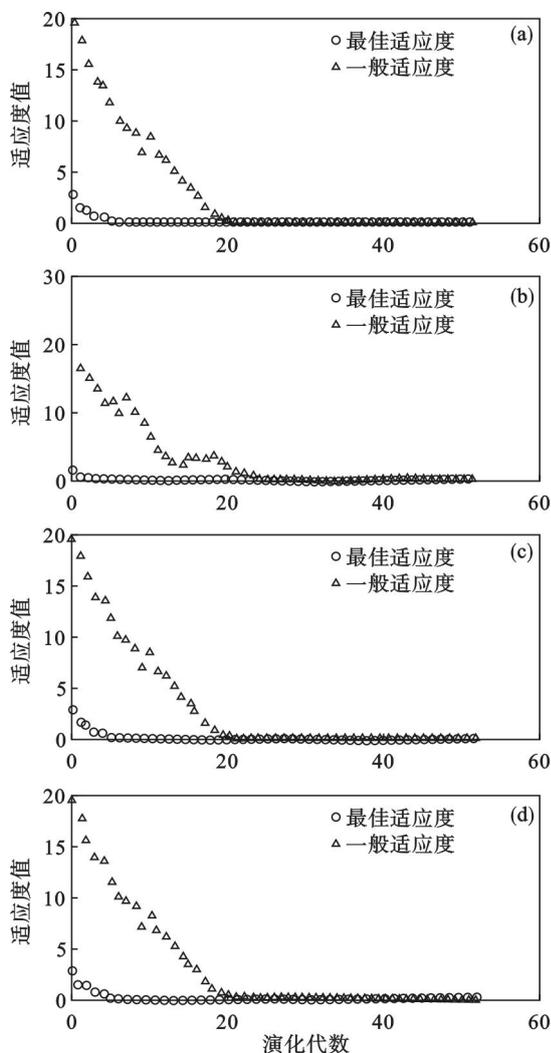


图 7 适应度函数收敛过程

Fig. 7 Convergence of fitness function

(a) —表 1 参数 1; (b) —表 1 参数 2;  
(c) —表 1 参数 3; (d) —表 1 参数 4.

用表 2 中的优化刃磨参数在二并联机床上刃磨螺旋面钻头之后,对测量钻头几何参数进行了

比较分析。

表 2 优化结果  
Table 2 Results of optimization

序号	$L/\text{mm}$	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$\omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$
1	1 096.3	0.8	0.9
2	1 095.4	2.7	3
3	929.2	1.2	0.3
4	956.2	0.5	0.3

图 8 所示用表 2 中的 4 组优化刃磨参数刃磨出的螺旋面钻头。

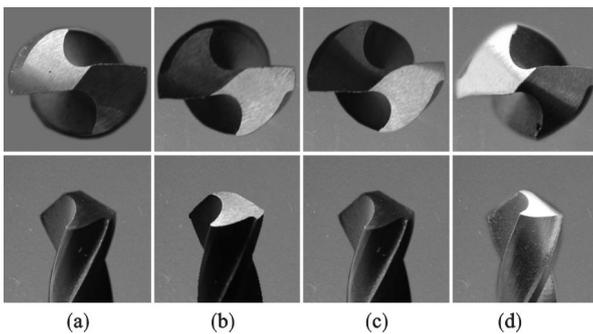


图 8 研磨的螺旋面钻头  
Fig. 8 Ground twist drill point

(a)—表 2 参数 1; (b)—表 2 参数 2;  
(c)—表 2 参数 3; (d)—表 2 参数 4.

根据文献[9-10]提出的方法,对刃磨的钻头几何参数进行测量,其结果如图 9 所示,产生误差原因是在加工及测量中存在一定的误差。

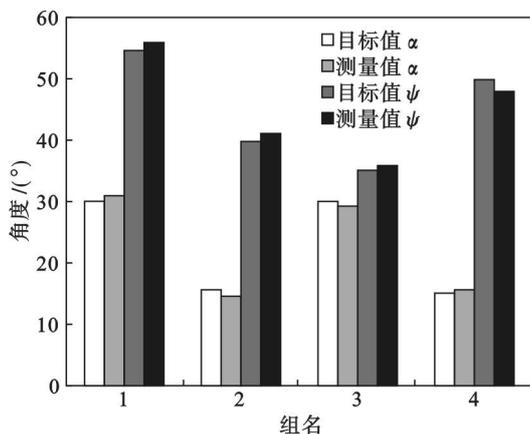


图 9 每个组的后角及横刃斜角测量结果  
Fig. 9 Measurement results of relief angle and chisel edge angle in each set

通过刃磨实验与测量结果可以看出,优化刃磨参数显著改善螺旋面刃磨性能,并在二并联机床刃磨出符合设计的麻花钻钻型。

## 4 结 论

1) 本文用二并联机床即可实现满足用户要

求的螺旋面钻尖刃磨. 二联杆平动机构的两个运动(滑块的平移运动和钻头的旋转运动)就可实现满足渐开螺旋面钻头刃磨需要的运动,螺旋面钻尖刃磨过程不需要大的工作空间并且磨削力相对较小,因此二并联机床能提供足够的工作空间和足够的刚度.

2) 通过用优化的刃磨参数进行螺旋面钻尖刃磨实验,结果验证了用二并联机床刃磨实际螺旋面时,用本文的优化刃磨参数提高了刃磨精度,并满足了用户要求的钻尖后角刃磨几何参数.

## 参考文献:

- [1] Zou P, Yang X L, Ai M Z. Study on helical drill point grinding with a biglide parallel grinder [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 97/98/99/100/101 (3): 2119 - 2122.
- [2] Tandon P, Gupta P, Dhand S G. Modeling of twist drills in terms of 3D angles [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 38 (5/6): 543 - 550.
- [3] Karabay S. Analysis of drill dynamometer with octagonal ring type transducers for monitoring of cutting forces in drilling and allied process [J]. *Materials and Design*, 2007, 28 (2): 673 - 685.
- [4] Hsieh J F. Mathematical modeling of complex helical drill point [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, 131 (6): 061006 - 1 - 061006 - 11.
- [5] Yan L, Jiang F. A practical optimization design of helical geometry drill point and its grinding process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 64 (9/10/11/12): 1387 - 1394.
- [6] Li B, Hu X P, Wang H. Analysis and simulation for a parallel drill point grinder part 1: kinematics, workspace and singularity analysis [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 31 (9/10): 915 - 925.
- [7] 韩荣第, 杨昌琪, 吴健. 麻花钻的数学建模及钻削过程有限元分析 [J]. *工具技术*, 2008, 42 (4): 52 - 58. (Han Rong-di, Yang Chang-qi, Wu Jian. Mathematic modeling of twist drill and finite element analysis of drilling [J]. *Tool Engineering*, 2008, 42 (4): 52 - 58.)
- [8] Paul A, Capoor S G, DeVor R E. Chisel edge and cutting lip shape optimization for improved twist drill point design [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing*, 2005, 45: 421 - 431.
- [9] Li Z, Zhang W, Xiong D. A practical method to determine rake angles of twist drill by measuring the cutting edge [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing*, 2010, 50: 747 - 751.
- [10] 菅磊, 彭彦平, 张晋. 基于图像处理技术的钻头后角测量方法研究 [J]. *工具技术*, 2010, 44 (2): 103 - 105. (Jian Lei, Peng Yan-ping, Zhang Jin. Measurement method of relief angle based on image processing technology [J]. *Tool Engineering*, 2010, 44 (2): 103 - 105.)