

## 高温合金螺纹铣削力优化研究

严凯 苏宏华 周井文 徐九华

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

**摘要:**针对高温合金材料的螺纹铣削加工,分析了切削厚度的表达方法,建立了相邻两次走刀形成的截面积的表达方法。在此基础上,研究了高温合金螺纹铣削过程中的铣削力和扭矩,结果表明:螺纹铣削时,铣削力及扭矩与截面积呈正相关。提出了通过使螺纹粗精加工过程中每次走刀的截面积相等,进而优化高温合金螺纹铣削径向切深的加工策略。该策略可有效控制切削力值和扭矩值,这不仅有利于提高刀具寿命和加工精度,亦为制定难加工材料螺纹铣削工艺提供了依据。

**关键词:**螺纹铣削;切削力优化;扭矩;切削厚度;截面积

**中图分类号:** TG62      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2014)05-0707-06

### Cutting Force Optimization in Thread Milling of Superalloy

Yan Kai, Su Honghua, Zhou Jingwen, Xu Jiuhua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,  
Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** To study the thread milling of superalloy, the definition and expression of uncut chip thickness are proposed, and the expression method of section area between two passes is introduced. On the basis of these concepts, the thread milling cutting force and torque of superalloy are studied. The result shows that thread milling cutting force and torque are positively related to section area. In the process of superalloy thread milling, the radial depth of cut is optimized by the same section area at every cutting step. The optimization method of cutting force and torque can improve part precision and tool life, and can be the theoretical basis for processing technology of thread milling of difficult-to-machine material.

**Key words:** thread milling; cutting force optimization; torque; uncut chip thickness; section area

随着数控加工技术的发展,逐渐出现了螺纹铣削方法,与传统螺纹加工工艺相比,其具有切削速度高、切削力小、加工精度高、同一把螺纹铣刀可以加工相同螺距不同尺寸的螺纹等优点<sup>[1]</sup>。

螺纹铣削的研究工作主要集中在理论和工艺两方面,在理论研究方面,文献[2,3]对铣削力的模型进行了深入的研究,探究了螺旋角大小对铣削力的影响规律。文献[4,5]对切削厚度和刀具角度进行了基础性研究,提出了切削厚度的计算表达式、分析了刀具角度对切削力的影响规律。在工艺研

究方面,李海滨<sup>[6]</sup>等人对螺纹铣刀的种类及铣刀选择做了系统研究,认为整体式的铣刀适合加工尺寸在 16 mm 以下的螺纹,而刀片式的螺纹铣刀适合尺寸在 16 mm 以上的螺纹加工。牟仲德<sup>[7-8]</sup>等人对螺纹铣削的编程技术进行了研究,将螺纹铣削的切入方法分为圆弧切入法、径向切入法和切向切入法 3 种,并推荐采用圆弧切入法。

螺纹铣削一般是多次走刀,分粗加工和精加工,但对于难加工材料,铣削时切削力较大,对加工精度和刀具寿命影响较大,一般实际工程中采用的

加工策略对于难加工材料的螺纹铣削加工缺乏指导意义。

本文主要开展了高温合金的螺纹铣削研究,分析了切削力产生影响的两个变量,建立了相邻两次走刀形成的截面积的表达式,并给出了瞬时切削力的表达式,解析了切削力、扭矩和截面积的关系,并以截面积来优化切削力,给出了高温合金螺纹铣削策略。

## 1 切削厚度与截面积

### 1.1 切削厚度

图1为用虚线表示的螺纹铣刀和铣刀两次走刀形成的切厚示意图。如图1所示,在一个螺距 $p$ 内,可以将铣刀上每个齿的切削刃分为上刃、中刃、下刃。切削厚度 $t_c$ 的定义为:铣刀的第 $i$ 个齿的切削刃在工件上形成的表面( $SCE_i$ )和第 $i+1$ 个齿的切削刃形成的表面( $SCE_{i+1}$ )之间的法向距离。

图2为铣刀切入工件的总体示意图。如图2所示, $a_{ei}$ 为第 $i$ 次走刀的径向切深, $d$ 为工件的直径, $d_i$ 为第 $i$ 次走刀时铣刀刀尖绕工件轴线的旋转直径, $n$ 为铣刀转速。

图3为未变形切屑三维图,图中 $P_{瞬}$ 为通过铣刀中刃与铣刀轴的平面, $P_{正}$ 为通过铣刀轴线和工件轴线的平面, $\theta$ 为 $P_{瞬}$ 与 $P_{正}$ 的夹角,也代表铣刀当前所处的位置( $0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}$ ),假设图3中黄色的未变形切屑上正对读者的那个面为 $SCE_1$ ,背面为 $SCE_2$ ,图中的3条红线为 $P_{瞬}$ 与 $SCE_1$ 的交线 $L_{交}$ ,可以看出以下规律:在刀具旋转切入的某一瞬时,沿 $z$ 轴正方向, $t_c$ 从0开始先逐渐增大,在下刃与中刃的过渡处 $t_c$ 达到最大值并过渡到上刃,然后 $t_c$ 逐渐减小,直到为0。所以刀刃的上下两端受力较小,中间区域受力较大。当 $z$ 坐标固定时,切厚

$t_c$ 在 $\theta=0$ 时为0,且随着 $\theta$ 的增大 $t_c$ 逐渐增大至最大值。

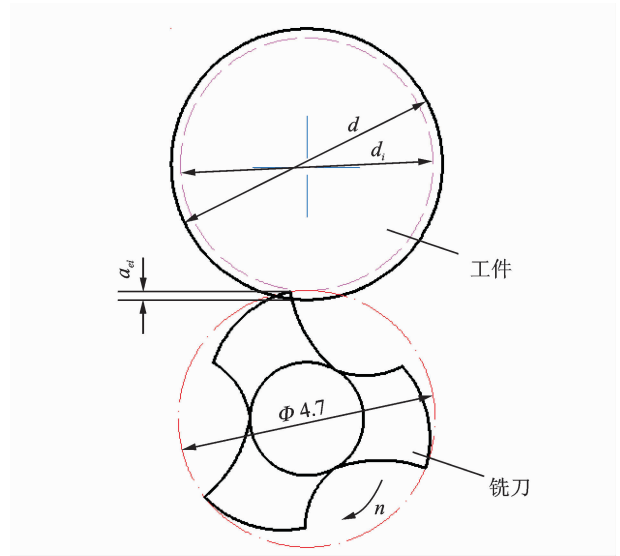


图2 铣削策略及径向切深

Fig. 2 Milling strategy and radial depth of cut

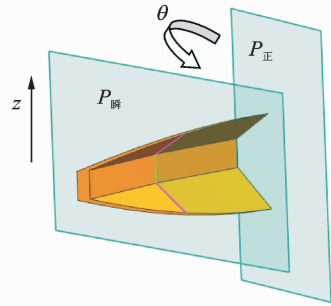


图3 未变形切屑三维图

Fig. 3 3-D undeformed chip

### 1.2 截面积

截面积 $A_c$ 为在由铣刀轴线与工件轴线构成的平面内,相邻两次走刀之间刀刃轮廓和工件母线围成的面积之差。因此,截面积的大小和刀尖的形状、径向切深有关。图4为每次走刀时铣刀刀刃与工件接触的截面积示意图。图中 $L$ 代表中刃的长度, $a_{ei}$ 代表第 $i$ 次走刀的径向切深值, $A_{ci}$ 代表对应的截面积大小。

截面积 $A_{ci}$ 的计算:

当 $i=1$ 时

$$A_{c1} = \left( a_{e1} + \frac{\sqrt{3}L}{2} \right)^2 \tan 30^\circ - \left( \frac{\sqrt{3}L}{2} \right)^2 \tan 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{3} a_{e1}^2 + a_{e1}L$$

当 $i \geq 2$ 时

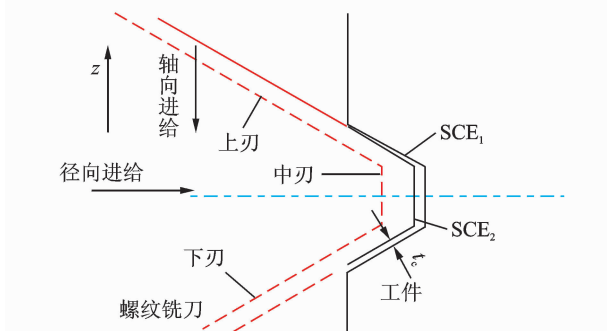


图1 铣刀轮廓及切削厚度

Fig. 1 Milling cutter profile and uncut chip thickness

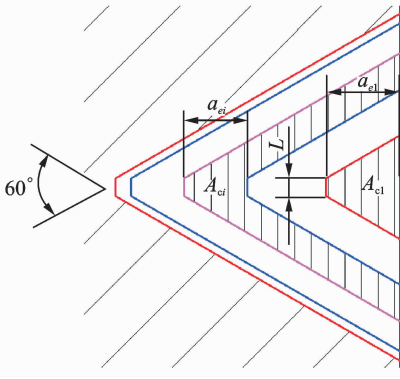


图4 截面积

Fig. 4 Section area

$$A_{ci} = \frac{\sqrt{3}}{3} a_{ci} \left( \sum_{k=1}^i a_{ck} + \sum_{k=1}^{i-1} a_{ck} \right) + a_{ci} L$$

由上式可知,若保持每次走刀的切深  $a_{ci}$  不变,那么  $A_{ci}$  将变得越来越大。

### 1.3 切削力的计算

如图3所示,在铣刀切入工件的某一瞬时,令铣刀与工件的接触面积为  $S_{\text{瞬}}$ ,则铣削过程中的瞬时切向力  $F_t$  与  $S_{\text{瞬}}$  成正比

$$F_t = K \cdot S_{\text{瞬}} \quad (1)$$

式中  $K$  为系数。由图3可知,  $L_{\text{交}}$  与  $t_c$  的值都随着  $\theta$  的改变而改变,因此两者都可以视为以  $\theta$  为自变量的函数。

根据切削原理可以得到

$$t_c(\theta) = f_z \cdot \sin\theta \quad (2)$$

式中  $f_z$  代表每齿进给量。显然,  $S_{\text{瞬}}$  与  $t_c$ ,  $L_{\text{交}}$  成正比,故有如下表达式成立

$$S_{\text{瞬}}(\theta) = K_1 \cdot t_c(\theta) \cdot L_{\text{交}}(\theta) \quad (3)$$

式中  $K_1$  为系数,将式(2)代入式(3)得

$$S_{\text{瞬}}(\theta) = K_1 \cdot f_z \cdot \sin\theta \cdot L_{\text{交}}(\theta) \quad (4)$$

再将式(3)代入式(1)得

$$F_t = K \cdot K_1 \cdot f_z \cdot \sin\theta \cdot L_{\text{交}}(\theta) \quad (5)$$

由1.1节可知,  $L_{\text{交}}(\theta)$  随着  $\theta$  的减小而增大,  $\sin\theta$  随着  $\theta$  的减小而减小,故  $F_t$  在  $\theta$  取某一特定值  $\theta_s$  时达到最大值。

令  $\theta = \theta_s$ ,  $K \cdot K_1 = K_2$ , 则

$$F_{t\text{max}} = K_2 \cdot f_z \cdot \sin\theta_s \cdot L_{\text{交}}(\theta_s)$$

$L_{\text{交}}(\theta_s)$  随着每次走刀的递增而增加,因此  $L_{\text{交}}(\theta_s)$  与截面积  $A_{ci}$  呈正相关,即可知  $A_{ci}$  与  $F_{t\text{max}}$  呈正相关。

截面积  $A_{ci}$  的大小容易计算,故通过优化  $A_{ci}$  即可以优化  $F_{t\text{max}}$ 。

## 2 实验条件与方案

### 2.1 实验材料

以高温合金 GH4169 为实验材料,其具有强度高、耐腐蚀性好、热稳定性强等优点,是一种在航空、航天领域中应用较广泛的零部件材料,试件尺寸为  $\Phi 4.96 \times 30$  mm。

### 2.2 主要实验装置

(1) 机床及测量设备:机床(DMG ULTRA-SONIC 20 linear 五轴加工中心),测力仪(Kistler 9265B 动态测力仪)。

(2) 刀具材料:选用硬质合金整体式三齿螺纹铣刀(TiAlCN 涂层、螺旋角  $15^\circ$ )。

### 2.3 切削力的测量方法

铣刀采用顺铣切削加工策略,图5为加工现场,工件夹持固定于测力仪上,调整测力仪坐标系与机床坐标系重合。切削加工时,刀具始终受到轴向力  $F_a$ ,切向力  $F_t$  和径向力  $F_r$ 。由于刀具的旋转运动,使得测力仪坐标系下的  $F_x, F_y$  值时刻在变化,但  $F_z$  始终和  $F_a$  保持一致,且在  $xy$  平面内有如下等式成立

$$F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{F_r^2 + F_t^2}$$

因此,在  $xy$  平面内刀具受到的  $F_{xy}$  保持不变。

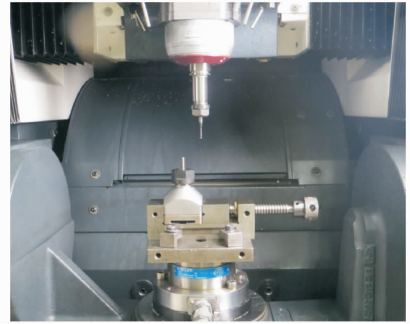
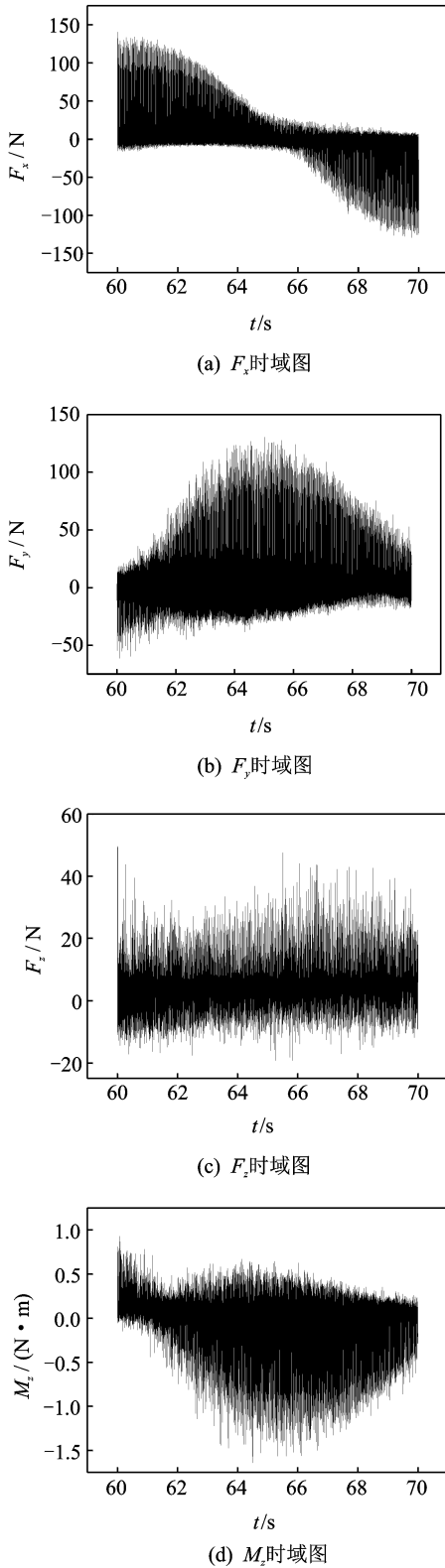


图5 加工现场

Fig. 5 Machining scene

图6为在  $v = 22.1$  m/min,  $f_z = 0.01$  mm/z,  $a_c = 0.1$  mm 工艺条件下的铣削力  $F_x, F_y, F_z$  与扭矩  $M_z$  的时域图,从图6中可以看到当切削力  $F_y$  达到最值时,  $F_x$  接近0值,  $M_z$  达到最值。当  $F_x$  达到最值时,  $F_y, M_z$  靠近0值,且  $F_x, F_y$  的最值十分接近。  $F_z$  的值上下浮动较小,因此在一个波形周期内  $F_x$  或  $F_y$  的最大值可以视为铣刀在  $xy$  平面内铣刀所受到的合力  $F_{xy}$ 。  $F_z$  的最大值可以视为铣刀受到轴向力的大小。

图6 铣削力  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  和扭矩  $M_z$  原始时域图Fig. 6 Original time-domain plots of  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_z$ 

## 2.4 实验内容与方案

加工螺纹规格: M5×0.8,按一般的加工方法,铣削过程共分5次走刀完成螺纹的粗加工与精加

工过程。每次走刀采用不同径向切深,  $a_{e1} = 0.17$  mm,  $a_{e2} = 0.15$  mm,  $a_{e3} = 0.12$  mm,  $a_{e4} = 0.10$  mm,  $a_{e5} = 0.03$  mm,总切深 0.57 mm。加工参数见表1,采用顺铣加工方式,刀具从上向下轴向运动。实验中测量每次走刀的铣削力。

表1 切削参数

Tab. 1 Cutting parameters

转速 $s/(r \cdot \text{min}^{-1})$	每齿进给量 $f_z/\text{mm}$	铣刀切削刃 半径 $r/\text{mm}$
1 500	0.01	2.35

## 3 实验结果与讨论

将实验中测得的每次走刀的铣削力及扭矩信号数据滤波后列于表2中,表2中  $F_{xy}$ ,  $F_z$ ,  $M_z$  取的是一个波形周期内的  $F_x$ ,  $F_z$ ,  $M_z$  的最大值。

表2 铣削力、扭矩和截面积

Tab. 2 Cutting force, torque and section area

走刀 顺序	$a_e/mm$	$F_{xy}/N$	$F_z/N$	$M_z/(N \cdot m)$	$A_{ci}/mm^2$
1	0.17	67.9	20.8	0.77	0.016 7
2	0.15	113.7	29.1	1.18	0.042 4
3	0.12	131.8	34.0	1.35	0.052 7
4	0.10	143.3	40.0	1.45	0.056 6
5	0.03	117.5	31.2	1.24	0.020 5

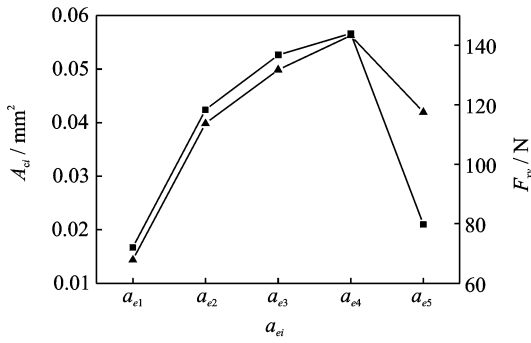
通过 Origin 软件将数据点拟合成曲线,如图7所示,表示铣削力、扭矩与截面积之间的变化关系。

观察图7中的曲线变化规律,可以看到切削力  $F_{xy}$ ,  $F_z$  的变化、扭矩  $M_z$  的变化和截面积  $A_{ci}$  的变化是基本吻合的,因此切削力、扭矩与截面积呈正相关,切削力大小随截面积的变化而变化。

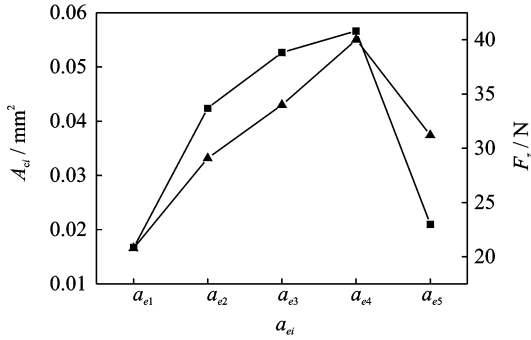
因为截面积  $A_{ci}$  和切深  $a_e$  之间存在函数关系,所以令每次走刀的截面积  $A_{ci}$  都相等即可得到优化后的切深  $a_{ei}$ 。特殊地,针对本实验建立如下方程

$$\begin{cases} A_{c1} = A_{c2} = A_{c3} = A_{c4} = A_{c5} \\ \sum_{i=1}^5 a_{ei} = 0.57 \end{cases}$$

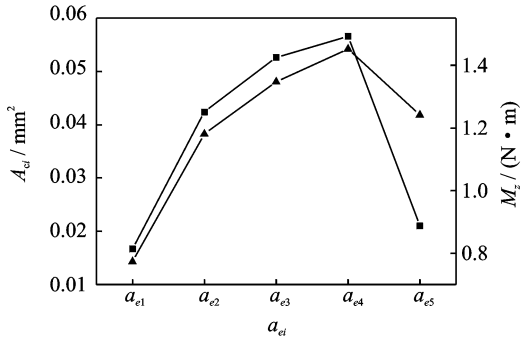
以上共5个方程,5个未知量,求解后取其中的唯一一组正解,即优化后的切深  $a_{ei}$ 。优化后的切深和未优化的切深对比如表3所示。优化前后,主要改变了第一刀的切深,使第一刀切深明显增大,中间三刀切深都减小,最后一刀切深略微增大。



(a)  $F_y$ 与 $A_{ci}$



(b)  $F_z$ 与 $A_{ci}$



(c)  $M_z$ 与 $A_{ci}$

图 7 径向切深与铣削力、扭矩、截面积的关系曲线

Fig. 7 Curves between radial depth of cut and cutting force/torque/ section area

表 3 优化前后切深对比

Tab. 3 Comparison of radial depth of cut before and after optimization

	$a_{e1}$	$a_{e2}$	$a_{e3}$	$a_{e4}$	$a_{e5}$
优化前后					mm
优化前	0.17	0.15	0.12	0.10	0.03
优化后	0.255	0.106	0.081	0.068	0.060

将优化后的切深代替原来的切深再次进行螺纹铣削实验,实验结果如表 4 所示。结果表明:每次走刀的切削力和扭矩最大值基本相等,将铣削力  $F_{xy}$ ,  $F_z$  分别控制在了 110, 30 N 以内,扭矩控制在

1.19 N·m 以内,即比原来的  $F_{xy}$ ,  $F_z$ ,  $M_z$  最大值分别减小了近 30 N, 10 N, 0.26 N·m。

表 4 优化后的切削力和扭矩

Tab. 4 Cutting force and torque after optimization

力与扭矩	$a_{e1}$	$a_{e2}$	$a_{e3}$	$a_{e4}$	$a_{e5}$
$F_{xy}/N$	109.8	110.7	105	106	108
$F_z/N$	29.0	29.5	28.0	28.2	28.1
$M_z/(N·m)$	1.17	1.19	1.12	1.14	1.14

因此,通过使每次走刀截面相等优化高温合金螺纹铣削径向切深的加工策略,减小了刀具的受力变化幅度,并使刀具在每次走刀过程中受力稳定,提高了螺纹的加工精度和刀具寿命。

## 4 结 论

通过对高温合金 GH4169 立柱的螺纹铣削实验,可以得出以下结论:

(1)给出了切削厚度在螺纹铣削中的变化规律、以径向切深为基础建立了截面积的表达式。解析了切削力与截面积之间的关系,分析与实验结果表明:螺纹铣削时铣削力和扭矩大小与截面积呈正相关关系。

(2)通过每次走刀的截面积的优化,建立了螺纹铣削时径向切深  $a_e$  的优化方法,可减小铣刀受到的交变力和冲击,提高铣刀寿命和螺纹的加工精度。

(3)以 GH4169 材料 M5 螺纹铣削为对象,通过优化截面积的方法,改善了切削力和扭矩峰值不均匀的现象,且使切削力与扭矩分别控制在 110.7 N 与 1.19 N·m 以下,为难加工材料的螺纹铣削加工工艺的制定提供了合理方法。

## 参考文献:

[1] 陈铭. PCD 螺纹铣刀的研制及生产应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.  
Chen Ming. Development and production application of PCD thread mill cutter[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.

[2] Araujo A C, Silveira J L, Jun M B G, et al. A model for thread milling cutting forces[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46 (15): 2057-2065.

[3] Araujo A C, Silveira J L, Kapoor S G. Force prediction in thread milling[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2004,

- 26(1):82-88.
- [4] Guillaume F, Gerard P. Geometrical analysis of thread milling—Part 1: Evaluation of tool angles[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(1/2/3/4):73-80.
- [5] Guillaume F, Gerard P. Geometrical analysis of thread milling—Part 2: Calculation of uncut chip thickness[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(1/2/3/4):81-87.
- [6] 李海滨, 朱姗姗, 杨义虎, 等. 铣削加工螺纹刀具的选择[J]. 机床与液压, 2008, 36(9):179-181.  
Li Haibin, Zhu Shanshan, Yang Yihu, et al. The choice of thread cutter when milling machining[J]. Machine tool & Hydraulics, 2008, 36(9):179-181.
- [7] 牟仲德, 牟仲风, 王林洪. 螺纹数控铣削加工及编程技巧[J]. 工具技术, 2011, 45(10):69-70.  
Mou Zhongde, Mou Zhongfeng, Yu Linghong. CNC thread milling and programming skills[J]. Tool Engineering, 2011, 45(10):69-70.
- [8] 蔺小军, 单晨伟, 史耀耀. 螺纹数控铣削加工技术研究[J]. 制造业自动化, 2010, 32(1):54-56.  
Lin Xiaojun, Shan Chenwei, Shi Yaoyao. The research on the technology of cnc milling thread[J]. Manufacturing Automation, 2010, 32(1):54-56.