

# 碳化硅晶须增强铝基复合材料自转位刀具车削试验\*

王大镇<sup>1</sup> 冯培锋<sup>1</sup> 李波<sup>1</sup> 刘华明<sup>2</sup>

(1. 集美大学机械工程学院, 厦门 361021; 2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

**【摘要】** 采用3种类型的刀具车削航天用碳化硅晶须增强铝基复合材料( $\text{SiC}_w/\text{LD}_2$ ), 用Kistler三向测力仪测量三向切削分力 $F_c$ 、 $F_p$ 、 $F_f$ , 用原子力显微镜AFM检测刀具刃口及已加工表面的微观形貌和轮廓。结果表明, 与圆形固定式刀具相比, 硬质合金自转位刀具表现出类似金刚石刀具的优异耐磨性, 其使用寿命延长60多倍, 刀具的切入与切出平稳, 切削过程颤振小; 已加工表面质量较好, 呈现铝基体的灰白铝色, 破碎的碳化硅晶须及孔洞较少, 表面粗糙度值较小; 其三向切削力 $F_c$ 、 $F_p$ 、 $F_f$ 都有不同程度的降低, 尤其是平均背吃刀抗力 $F_p$ 减少了30%~60%。硬质合金自转位刀具是切削加工中、低体积分数航天用碳化硅晶须增强铝基复合材料低成本高性能的一类刀具。

**关键词:** 铝基复合材料 自转位刀具 刀具寿命 切削力

**中图分类号:** TH161<sup>+.1</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)01-0221-05

## Experiments on Cutting of SiC Whisker Reinforced Aluminum Composite with Self-propelled Rotary Tools

Wang Dazhen<sup>1</sup> Feng Peifeng<sup>1</sup> Li Bo<sup>1</sup> Liu Huaming<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

(2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

### Abstract

Different types of cutting tools were used to cut SiC whisker reinforced aluminum composite. And then the 3-D components of cutting forces  $F_c$ ,  $F_p$ , and  $F_f$  were measured with a Kistler 3-D dynamometer, and the microscopic pattern and profiles of the cutting edges and the machined surfaces were examined with an atomic force microscope (AFM). The results showed that, compared with fixed circular cutters the self-propelled rotary carbide tools had superior wear-resistance property similar to that of diamond tools. The tool life had increased more than 60 times with stable cut-in and cut-out and less oscillation in the cutting process. The machined surfaces showed high quality, gray metal shine of the aluminum matrix, smaller surface roughness, and less broken SiC whiskers and pits. The 3-D cutting force components  $F_c$ ,  $F_p$ , and  $F_f$  were reduced to some degree. The average radial thrust cutting force  $F_p$  had a significant reduction of 30%~60%. The self-propelled rotary carbide tools were thought to be one kind of tools with low cost and high cutting performance and a suitable tool in machining the composites reinforced with SiC whiskers of moderate or lower volume fractions.

**Key words** Aluminum matrix composite, Self-propelled rotary tool, Tool life, Cutting force

### 引言

碳化硅晶须(silicon whisker of carbide,  $\text{SiC}_w$ )增

强铝基复合材料具有优良的性能,但由于材料中 $\text{SiC}_w$ 陶瓷增强相的高硬度,给该类铝基复合材料的切削加工带来了严峻的挑战<sup>[1-6]</sup>。对其切削加工性

能的研究还处于起步阶段,国内外多数研究者只是在粗加工、半精加工的切削工况下,发现切削该类铝基复合材料时,在极短的时间内高速钢、硬质合金及硬质合金涂层刀具等常规刀具便超过磨钝标准而不能继续使用。

本文采用特殊结构形式的刀具——硬质合金圆形自转位刀具切削碳化硅晶须增强的铝基复合材料( $\text{SiC}_w/\text{LD}_2$ ),探索切削过程中刀具的切削加工性能、工件加工质量、切削力的变化规律,试图找到该种复合材料的低成本加工方法。

## 1 试验及检测

### 1.1 试验材料

试验材料采用  $\text{SiC}_w/\text{LD}_2$  棒材,增强相为碳化硅晶须  $\text{SiC}_w$ ,直径  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ ,长度  $10 \sim 100 \mu\text{m}$ ,试验材料的其他参数,如表 1 所示。

表 1 材料的物理及力学性能

Tab. 1 Physical and mechanical properties of the materials

试验材料	体积分数	密度	抗拉强度	弹性模量	延伸率	增强相平均尺寸
	$V_f/\%$	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$E/\text{GPa}$	$\delta/\%$	$D/\mu\text{m}$
$\text{SiC}_w/\text{LD}_2$	17	2.75	400~450	110	3.0	0.1~1
$\text{SiC}_w/\text{LD}_2$	25	2.77	450~500	120	2.5	0.1~1
$\text{SiC}_w/\text{LD}_2$	35	2.80	500~550	135	2.2	0.1~1

### 1.2 试验条件及检测仪器

试验选用 CA6140 型车床,所用刀具的种类及参数,如表 2 所示。用 Kistler 三向测力仪测量三向切削分力  $F_c$ 、 $F_p$ 、 $F_f$ 。原子力显微镜为美国 Digital Instruments 公司生产,检测时采用轻敲模式、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  探针,针尖锥角  $35^\circ$ 。

表 2 试验用刀具参数及切削条件

Tab. 2 Parameters and cutting conditions of the used tools

刀具材料	结构形式	几何角度/ $^\circ$					刀具直径	切削液
		$\gamma_0$	$\alpha_0$	$K_r$	$K'_r$	$\lambda_s$		
K10TiN 涂层	圆形自转位式	6	14			35	$\Phi 20$	干切
K10TiN 涂层	圆形固定式	6	14			35	$\Phi 20$	干切
PCD	焊接式	0	10	90	15	0		干切

## 2 结果与讨论

### 2.1 自转位刀具切削原理

自转位刀具切削过程中,圆形刀具一边随着刀体作直线走刀运动,一边绕其自身轴线作转位运动,如图 1 所示。

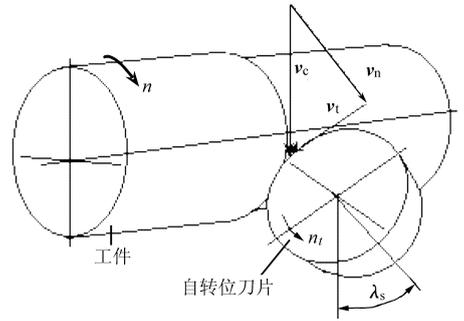


图 1 自转位刀具切削原理图

Fig. 1 Cutting principle of self-propelled rotary tool

自转位刀具在切削过程中不附加外力驱动源,靠工件和刀具之间的相对运动驱动旋转,刀具的旋转方向和速度主要取决于切削速度和倾斜角,根据图 1 有以下几何关系

$$\begin{cases} v_c = v_n + v_t \\ v_t = v_c \sin \lambda_s \\ v_n = v_c \cos \lambda_s \end{cases} \quad (1)$$

式中  $v_n$ ——工件的线速度,  $\text{m}/\text{min}$

$v_t$ ——自转位刀具的线速度,  $\text{m}/\text{min}$

$v_c$ ——切削速度,  $\text{m}/\text{min}$

$\lambda_s$ ——切削刃倾斜角度,  $(^\circ)$

### 2.2 刀具磨损及耐用度

#### 2.2.1 刀具磨损

刀具磨损后将影响切削力、切削温度和已加工表面质量。为此,根据加工情况需规定一个刀具许用磨损值(即刀具磨钝标准),本文设定刀具后刀面的磨损值  $V_{B_{\max}} = 0.3 \text{ mm}$  为磨钝标准。

采用硬质合金自转位涂层刀具 K10TiN、圆形固定式刀具和聚晶金刚石 PCD 刀具,在切削速度  $v_c = 57 \text{ m}/\text{min}$ ,进给量  $f = 0.14 \text{ mm}/\text{r}$ ,切削深度  $a_p = 0.2 \text{ mm}$  的切削工况下,切削体积分数为  $V_f = 17\%$  的  $\text{SiC}_w/\text{LD}_2$  铝基复合材料时得到的刀具磨损曲线,如图 2 所示。

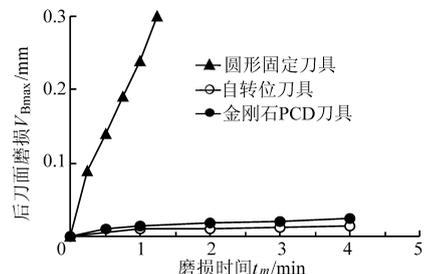


图 2 3 种刀具的磨损曲线

Fig. 2 Wear histories of three types of cutters

从图中可以发现,硬质合金圆形固定式刀具切削 1 min 左右就达到了磨钝标准。而圆形自转位刀具切削该类铝基复合材料却表现出优异的耐磨性,其刀具的耐用度较固定式刀具提高 65 倍,其耐磨性

接近金刚石刀具。观察自转位刀具切削加工后的后刀面,发现沿刀具整个圆周磨损均匀且轻微,磨损痕迹方向一致,前刀面上没有生成积屑瘤,这与文献[3]得出的结论相同。

### 2.2.2 刀具耐用度估算

自转位刀具具有较高的耐磨性的主要原因在于刀具的自转位使得整个切削刃都参加切削,切削刃工作点间歇交替,使磨损能分布在比固定式刀具长得多的切削刃上,从而减轻了切削负荷。

在忽略切削刃散热,同时认为刀具不产生急剧破损,则自转位刀具较圆形固定式刀具耐用度提高的倍数估算为<sup>[7]</sup>

$$K = \frac{2\pi}{\frac{f}{2R_1} + \cos\lambda_s \sqrt{\frac{2a_p}{R_1} + \left(\frac{a_p}{R_1} \tan\lambda_s\right)^2}} \quad (2)$$

式中  $R_1$ ——刀具半径,mm

切削过程中,自转位刀具与固定式刀具相比,实际切削路程长度短,切削刃瞬时工作时间短,冷却时间长,散热条件好。同时参与切削的刀刃始终有氧化膜等保护层,当保护层被铝基复合材料中的高硬度增强相擦伤后,该部分切削刃已离开切削区,并很快产生了新的氧化膜保护层。

自转位刀具耐用度提高的另外两个原因是:  
①切削区中部分滑动摩擦被滚动摩擦所代替,使得刀具与工件加工表面,刀具与切屑间的摩擦因数降低。  
②自转位刀具的切削速度  $v_c$  随着刀刃倾斜角的增大而减小。

### 2.2.3 刀具耐磨度影响因素分析

#### (1) 切削速度

切削速度对刀具寿命和材料切除量的影响曲线,如图3所示。

从图3a中发现,固定式刀具的切削速度对刀具寿命的影响曲线倾斜约为45°,而硬质合金自转位刀具的寿命曲线倾斜大于45°。即随着切削速度的增加,自转位刀具的寿命较固定式刀具下降得更慢一些。从图中还可以发现,自转位刀具与固定式刀具相比寿命显著提高,如切削速度为100 m/min时,固定式刀具的寿命不足1 min,而自转位刀具的寿命已经超过1 h,两者相比寿命提高超过65倍。

比较图3a和图3b可以发现,尽管随着切削速度的增加,自转位刀具的寿命有所下降,但其生命周期内切除的材料却有较大幅度的增加。综合考虑,采用自转位刀具加工时,宜采用较大的切削速度。

#### (2) 进给量

进给量对刀具寿命和材料切除量的影响曲线,如图4所示。

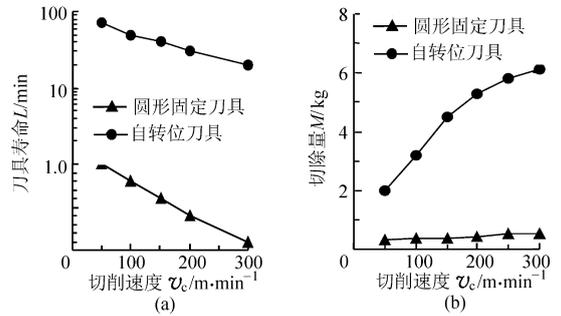


图3 切削速度对刀具寿命和材料切除量的影响

Fig.3 Influence of cutting speed on tool life and amount of material removal

(a) 刀具寿命 (b) 材料切除量

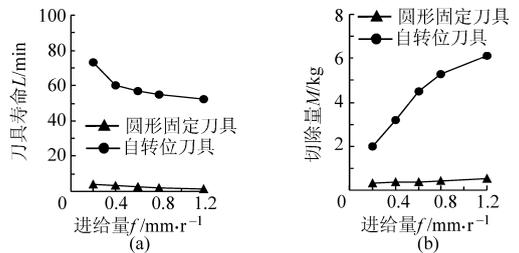


图4 进给量对刀具寿命和材料切除量的影响

Fig.4 Influence of feed rate on tool life and amount of material removal

(a) 刀具寿命 (b) 材料切除量

比较图4a和图4b会发现,进给量对自转位刀具的寿命影响并不严重。尽管自转位刀具的寿命随着进给量的增加而有所减小,但刀具在其生命周期内切除的材料反而增加。如将进给量从0.4 mm/r增加到0.8 mm/r,刀具寿命减小15%,而材料的切除率却提高了约40%。因此,采用自转位刀具切削铝基复合材料时宜采用较高的进给量。

#### (3) 倾斜角

在切削速度为  $v_c = 57$  m/min, 进给量  $f = 0.14$  mm/r, 切削深度  $a_p = 0.2$  mm的切削工况下,切削体积分数为  $V_r = 25\%$  的复合材料时,刀具倾斜角度对刀具寿命的影响曲线,如图5所示。

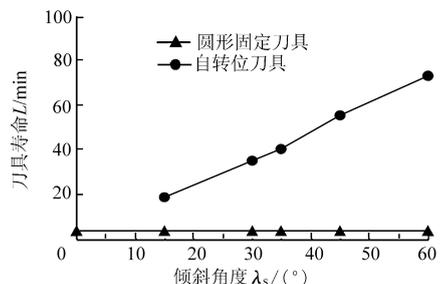


图5 倾斜角度对刀具寿命的影响

Fig.5 Influence of the inclination angle on tool life

从图5中可以发现,倾斜角对固定式刀具的寿命影响较小,但对自转位刀具的寿命却有重大的影响。例如,在57 m/min的切削速度下,当倾斜角度

从 15°增加到 30°时,刀具的寿命延长了 90%,当增加到 35°时,增加了 116%,增加到了 45°时,增加了 197%,进一步增加到 60°时,则刀具的寿命增加到了 295%,此时,刀具的寿命超过了 70 min,为固定式刀具寿命的 63 倍。

2.2.4 刀具的磨损形式与形貌

用自转位刀具切削 SiC<sub>w</sub> 增强铝基复合材料时,刀具的磨损形式与形貌同固定式刀具相比有如下特点:①磨损均匀地分布在切削刃的整个圆周上,而固定式刀具则仅产生在直接参与切削的那段切削刃上。②在刀具前、后刀面上都没有积屑瘤产生,而在固定式刀具的刀具前刀面上产生了积屑瘤<sup>[2-3]</sup>。③两种刀具的磨损及破损形式基本相同,主要为前、后刀面的磨料磨损,刃口部位由增强相断头引起的刃口断裂及掉尖。

刀具未切削时完整刀具刃口 AFM 图像,如图 6 所示,刀具切削后刃口处发生了破损时的 AFM 图像,如图 7 所示。

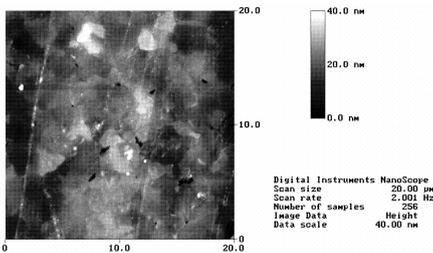


图 6 完整的刀具刃口

Fig.6 Cutting edge of unworn tools

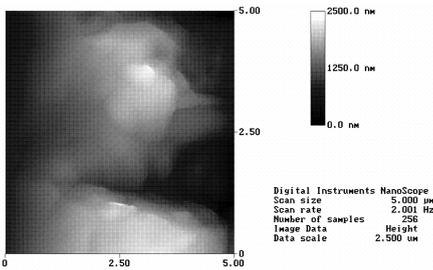


图 7 产生磨损的刀具刃口

Fig.7 Cutting edge of worn tools

2.3 自转位刀具的加工表面质量分析

自转位刀具加工件的表面质量较好,切出的工件表面呈正常的灰白铝色,与金刚石刀具切出的工件表面几乎完全相同。其显微结构中,变质层中的增强相 SiC<sub>w</sub> 沿切削方向重新取向的数量较少,工件表面上因切削而破碎的增强相数量也较少。

产生上述结果的原因是由于自转位刀具保持了较小的实际刃口钝圆半径,从而在形成已加工表面时,复合材料中的增强相多数被刃口直接切断。另外,较小的刃口钝圆半径和较轻的后刀面磨损,使切削区尤其是 SiC<sub>w</sub>-Al 界面附近的铝基体弹塑性变形

程度较小。

自转位刀具切削时,对加工表面有一定的滚压作用,与圆形固定刀片相比,即使在较大的进给量时仍能获得较小的表面粗糙度,两者已加工表面轮廓的对比,如图 8 和图 9 所示。

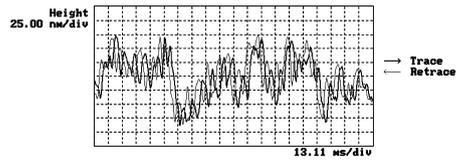


图 8 固定式刀具加工的表面轮廓

Fig.8 Profile of machined surface cut by fixed circular tool

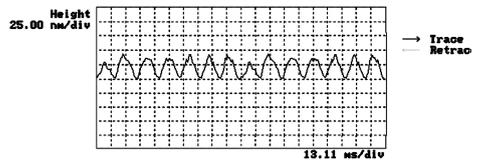


图 9 自转位刀具加工的表面轮廓

Fig.9 Profile of machined surface cut by rotary tool

2.4 切削力

2.4.1 切削力变化规律

采用硬质合金 K10TiN 涂层圆形固定刀具和自转位刀具,切削 25% 体积分数的 SiC<sub>w</sub>/LD<sub>2</sub> 铝基复合材料时,切削用量与主切削力 F<sub>c</sub>、背吃刀抗力 F<sub>p</sub> 之间的关系曲线如图 10~12 所示。

图 10 中的切削工况为进给量 f=0.08 mm/r,切削深度 a<sub>p</sub>=0.2 mm。

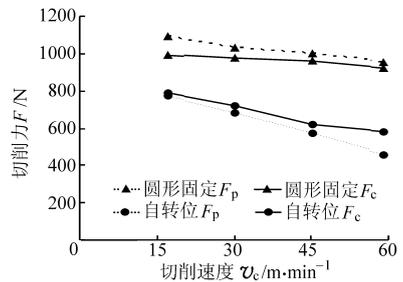


图 10 切削速度对切削力的影响

Fig.10 Influence of cutting speed on cutting forces

图 11 中的切削工况为切削速度 v<sub>c</sub>=57 m/min,切削深度 a<sub>p</sub>=0.3 mm。

图 12 中的切削工况为切削速度 v<sub>c</sub>=57 m/min,进给量 f=0.08 mm/r。

在 v<sub>c</sub>=57 m/min, f=0.08 mm/r, a<sub>p</sub>=0.4 mm 的切削工况下,圆形固定刀具和自转位刀具的背吃刀抗力波形如图 13 所示。

2.4.2 切削力特性分析

采用硬质合金 K10TiN 涂层圆形自转位刀具切

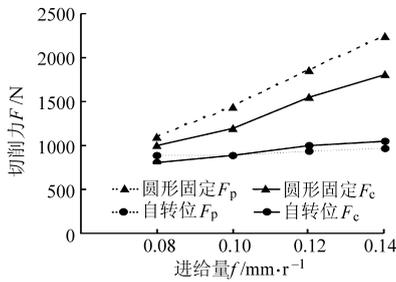


图 11 进给量对切削力的影响

Fig. 11 Influence of feed rate on cutting forces

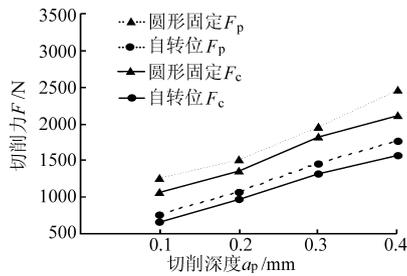


图 12 切削深度对切削力的影响

Fig. 12 Influence of cutting depth on cutting forces

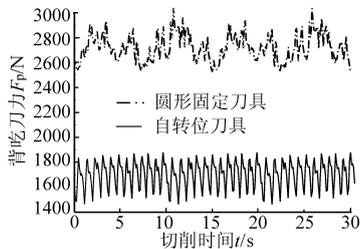


图 13 背吃刀抗力波形图

Fig. 13 Measurements of the radial thrust cutting forces

削  $\text{SiC}_w/\text{LD}_2$  复合材料,与使用 K10TiN 涂层圆形固定刀具相比,可以发现存在如下特殊规律:

(1)背吃刀抗力  $F_p$  减小 30% ~ 60%,峰值减小 70% ~ 80%。

背吃刀抗力减小的原因是自转位刀具切削时存在一个较大的刃倾斜角  $\lambda_s$ ,减小了实际刃口半径  $r_e$ ,相应地增大了刀具有效工作前角  $\gamma_{oe}$ ,几何关系为

$$r_e = r_n \cos \lambda_s \quad (3)$$

式中  $r_n$ ——法剖面内的刃口半径,mm

$$\sin \gamma_{oe} = \sin \lambda_s^2 + \cos \lambda_s^2 \sin \gamma_o \quad (4)$$

式中  $\gamma_o$ ——刀具前角, ( $^\circ$ )

因此,自转位刀具较固定式刀具变得更加锋利,切削时铝基体的塑性变形大幅度减小,增强相  $\text{SiC}_w$  被刀具刃口直接切断的数量大幅度增加,切削过程变得轻快省力,使得切削力的平均值和峰值都减小。

### (2) 切削力变化的特殊性

根据单相金属材料的切削理论<sup>[8]</sup>,切削 45 号钢及铝合金材料时,主切削力  $F_c$  远大于背吃刀抗力  $F_p$  及进给力  $F_f$ 。而对  $\text{SiC}_w/\text{LD}_2$  铝基复合材料来说,当增强相的体积分数超过某阈值时,背吃刀抗力  $F_p$  及进给力  $F_f$  将超过主切削力  $F_c$ 。为了表征这一现象,引入切削力系数 ( $K_p = F_p/F_c, K_f = F_f/F_c$ )。

### (3) 切削用量的影响

随着切削速度的增加(图 10),自转位刀具和固定刀具的切削力都呈减小的趋势,但固定式刀具切削力系数  $K_p > 1$ ,而自转位刀具切削力系数  $K_p < 1$ ,且减小的幅度更大。

随着进给量的增大(图 11),固定刀具的切削力增加剧烈,其切削力系数  $K_p > 1$ ,而自转位刀具的切削力增幅很小,其切削力系数  $K_p$  由大于 1 转变为小于 1,且减小的趋势明显。

## 3 结论

采用硬质合金自转位刀具切削碳化硅晶须增强铝基复合材料( $\text{SiC}_w/\text{LD}_2$ )有如下特点:

(1)切削力较小,尤其是背吃刀抗力可减小 30% ~ 60%,峰值可减少 70% ~ 80%。

(2)切入和切出都很平稳,切削力峰谷值变化较小,刀具磨损轻微,切削中、低体积分数的复合材料时,刀具的寿命可与金刚石刀具相比。

(3)加工时宜采用较高的切削速度和较大的进给量进行切削加工。

(4)已加工表面粗糙度值较小。

(5)自转位刀具是切削加工中、低体积分数的碳化硅晶须增强铝基复合材料比较理想的刀具之一。

## 参 考 文 献

- Caroline J E Andrewes. Machining of an aluminum/SiC composite using diamond inserts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 102(1~3): 25~29.
- 王大镇,冯培锋,赵清亮,等. 航天铝基复合材料零部件超精密加工技术研究[J]. 宇航学报, 2006(6): 1341~1346. Wang Dazhen, Feng Peifeng, Zhao Qingliang, et al. Study on the ultraprecision machining technology of aluminum-matrix composite astronautic parts[J]. Journal of Astronautics, 2006(6): 1341~1346. (in Chinese)
- Chen Ping. High-performance machining of SiC whisker-reinforced aluminium composite by self-propelled rotary tools[J]. Annals of the CIRP, 1992, 41(1): 59~62.
- Yuan Z J, Geng L. Ultraprecision machining of  $\text{SiC}_w/\text{Al}$  composites[J]. Annals of the CIRP, 1993, 42(1): 107~109.

- 5 邓建新, 曹同坤, 艾兴.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{CaF}_2$  自润滑陶瓷刀具切削过程中的减摩机理[J]. 机械工程学报, 2006, 42(7): 109 ~ 113.  
Deng Jianxin, Cao Tongkun, Ai Xing. Friction reducing mechanisms of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{CaF}_2$  self-lubricating ceramic tool in machining processes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(7): 109 ~ 113. (in Chinese)
  - 6 石森森. 固体润滑技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
  - 7 阎逢元, 林新华, 周惠梯, 等. 铝基镶嵌材料的磨损特性及耐磨机理[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(3): 271 ~ 274.  
Yan Fengyuan, Lin Xinhua, Zhou Huiti, et al. The wear behaviors and anti-wear mechanism of aluminum based embedded composites[J]. Tribology, 1999, 19(3): 271 ~ 274. (in Chinese)
  - 8 刘如铁, 李溪滨, 熊拥军, 等. 镶嵌 PTFE 镍基固体自润滑材料的研究[J]. 润滑与密封, 2005(6): 55 ~ 57.  
Liu Rutie, Li Xibin, Xiong Yongjun, et al. Study on nickel base solid self-lubricating materials studded with PTFE[J]. Lubrication Engineering, 2005(6): 55 ~ 57. (in Chinese)
  - 9 Jaydeep K, Ioan N, Efsthios I M. Sliding wear behavior of PTFE composites[J]. Wear, 2002, 252(5 ~ 6): 361 ~ 369.
  - 10 Broshcheva P N, Okhlopko A A, Yuchyugyavea T S. The effect of natural zeolite rock on the tribological behavior of polytetrafluorethylene[J]. Friction and Wear, 2001, 22(1): 58 ~ 61.
  - 11 Deng J X, Song W L, Zhang H. Design, fabrication and properties of a self-lubricated tool in dry cutting[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(1): 66 ~ 72.
  - 12 陈日曜. 金属切削原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
  - 13 [日]中山一雄. 金属切削加工理论[M]. 李云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 1985.
  - 14 [日]白井英治. 金属加工力学[M]. 廉云国, 徐东安, 陈振孟, 译. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- 

(上接第 225 页)

- 5 Quan Yanmin, Yu Qixun, Xie Lijing. Study on the adaptability of thick film diamond tool to cutting composites[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(4): 501 ~ 504.
- 6 Chan K C, Cheung C F. A theoretical and experimental investigation of surface generation in diamond turning of an Al6061/ $\text{SiC}_p$  metal matrix composite[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(9): 2 047 ~ 2 068.
- 7 常兴, 庞学慧, 陈五一. 自滚切端铣刀[J]. 工具技术, 1995, 29(11): 2 ~ 8.  
Chang Xing, Pang Xuehui, Chen Wuyi. Self-propelled rotary face milling tool[J]. Tool Technology, 1995, 29(11): 2 ~ 8. (in Chinese)
- 8 中山一雄. 金属切削加工理论[M]. 李云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 1985: 10 ~ 130.