

文章编号 1004-924X(2009)10-2512-08

金刚石飞切加工微结构表面的工艺参数优化

赵清亮¹, 郭兵¹, 杨辉², 王义龙¹

(1. 哈尔滨工业大学 精密工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国航空精密机械研究所, 北京 100076)

摘要: 为了获得具有纳米级表面质量的微结构表面, 利用‘Nanosys-300’超精密复合加工系统实现了微结构表面的三维金刚石飞切加工, 研究了主轴转速、进给量以及背吃刀量对微结构表面粗糙度的影响。理论分析表明, 金刚石飞切加工微结构时理论表面粗糙度沿法线方向并没有变化, 而沿进给方向存在着周期变化。减小进给量和金刚石飞刀前端角或增大切削半径可以降低理论粗糙度值。实验分析表明, 表面粗糙度值 R_a 随进给量的增加而增加, 主轴转速对 R_a 影响不大。切削聚碳酸酯(PC)时, 在 $5\sim 40\ \mu\text{m}$ R_a 随背吃刀量的增加而增加; 而切削铝合金(LY12)时, 在 $2\sim 10\ \mu\text{m}$ R_a 随背吃刀量的增加而减小。实验中 R_a 最好可达 $38\ \text{nm}$ (LY12)和 $43\ \text{nm}$ (PC)。最后, 利用优化工艺参数加工出了微沟槽阵列和微金字塔矩阵微结构。

关键词: 超精密加工; 微结构表面; 飞切加工; 金刚石刀具; 表面粗糙度

中图分类号: TG506.6 **文献标识码:** A

Technological parameter optimization of micro-structured surfaces by diamond fly-cutting

ZHAO Qing-liang¹, GUO Bing¹, YANG Hui², WANG Yi-long¹

(1. Center for Precision Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. China Precision Engineering Institute For Aircraft Industry, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to obtain micro-structured surfaces with nano-surface finish, a three-dimensional diamond fly-cutting system was established based on a ‘Nanosys-300’ ultra-precision machining system. The effects of the spindle speed, feed rate, as well as the cut depth on the roughness were investigated, respectively. The analytical result of Theoretic Surface Roughness (TSR) shows that the TSR is a constant along the normal direction, while TSR is a periodic variety along the feed direction. The TSR is reduced with the decreases of feed rate and nose angle of a tool or the increase of cutting radius. The experimental results reveal that roughness R_a is reduced with the decreases of feed rate and cut depth on Polycarbonate(PC), while it is increased with the decrease cut depth or the increase of feed rate on aluminium(LY12). However, the spindle speed have not a significant impact on R_a for both materials. The roughness of $38\ \text{nm}$ on LY12 and $43\ \text{nm}$ on PC are achieved. Finally, a micro pyramid array and a V-groove array are processed with the pointed V-shaped single crystal diamond tool on aluminum alloy LY12 successfully.

收稿日期: 2008-11-19; **修订日期:** 2008-12-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50675051); 黑龙江省归国留学人员基金资助项目(No. LC0C11); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(No. NCET-07-0246)

Key words: ultra-precision machining; micro-structured surface; fly-cutting; diamond tool; surface roughness

1 引言

随着科技的发展,微结构表面在光学领域、机械电子领域、生物医学领域和军事领域都显示出越来越重要的应用价值和广阔的应用前景^[1-3]。微结构功能表面的高精度、高效率、低成本加工制造引起了世界各国广泛的关注与研究。金刚石飞切加工是一种高效的超精密加工技术。与其它金刚石加工方法相比,金刚石飞切加工能加工出比较复杂的表面结构,尤其对于线性槽微结构和由多条相交线组成的微槽结构阵列,重复性的棱柱矩阵、金字塔矩阵和应用于特殊反射表面涂层、薄片和磁带的微结构的加工,金刚石飞切加工都起着极其重要的作用^[4-6]。它可以在没有后期抛光的情况下直接加工出具有纳米级表面质量和亚微米级面形精度的微结构表面^[7-9]。由于金刚石飞刀切削加工在微结构功能表面加工制造方面的众多优势,其在通讯设备、医疗设备、微光学元件等制造业中拥有广泛的应用前景。

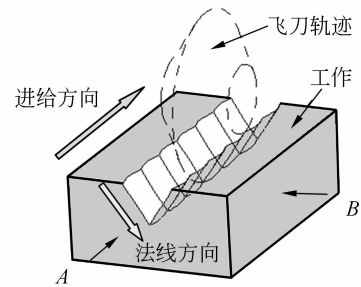
对于一种特定的微结构,金刚石飞切加工通常利用切削运动中金刚石刀尖的运动轨迹形成被加工微结构的形状。由于工件加工表面由刀具加工轨迹组成,加工中刀具的运动轨迹比较复杂,加工过程对机床的要求较高,往往需要多轴精密联动^[10,11]。然而,由于国外发达国家对我国大陆的技术封锁,目前我国大陆地区自行研制的超精密机床还只局限于两轴精密联动。因此在我国大陆地区,使用金刚石飞切加工微结构表面的研究尚没有深入开展。

在本研究中,首先对金刚石飞切加工微结构时的理论表面粗糙度进行了分析,然后利用中国航空精密机械研究所研制的两轴联动‘Nanosys-300’超精密复合加工系统在聚碳酸酯(PC)和铝合金 LY12 上实现了微结构表面的三维金刚石飞切加工,利用扫描电子显微镜和表面粗糙度轮廓仪对微结构的表面质量进行检测分析,研究了在金刚石飞切加工中工艺参数对微结构表面粗糙度的影响,并实际加工了微沟槽阵列和微金字塔矩阵。该项研究为形成一种比较完善的线性槽微结

构功能表面和由多条相交线组成的微槽结构阵列的金刚石飞切加工工艺方法积累了经验基础。

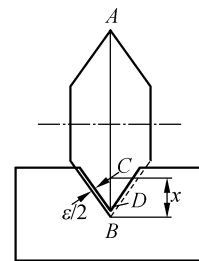
2 金刚石飞切加工微结构表面的理论粗糙度分析

金刚石飞切加工为断续加工,金刚石刀具随飞刀盘每旋转一周,刀具与工件只接触一次,而在



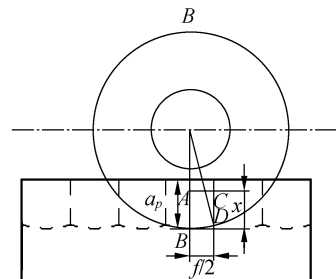
(a) 表面残留高度示意图

(a) Sketch map of arithmetic peak-to-valley height



(b) A 方向视图

(b) View of A direction



(c) B 方向视图

(c) View of B direction

图 1 金刚石飞刀切削微结构表面残留高度

Fig. 1 Arithmetic peak-to-valley height of micro-structures by fly-cutting

每次切削过程中切深又是随飞刀盘的旋转角度不断变化的。由于刀具和工件相对运动及刀具几何形状的关系,有一小部分工件材料未被切削下来,残留在已加工表面上,称为表面残留高度(如图 1 所示),实际的表面粗糙度都是由其他影响因素在这个基本形貌上叠加的结果。从图中可以看出微结构表面的残留高度沿法线方向并没有变化,而沿进给方向存在着周期性变化。

通过计算可得,在微结构 $x(x \leq a_p)$ 深处,微结构两侧残留面积高度 R_{\max} 和理论表面粗糙度 R_a 分别为:

$$R_{\max} = \sin \frac{\varepsilon}{2} \cdot \left(R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{f}{2} \right)^2} \right), \quad (1)$$

$$R_a = 0.2538 \cdot \sin \frac{\varepsilon}{2} \cdot \left(R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{f}{2} \right)^2} \right). \quad (2)$$

式中, R 为切削半径(刀尖到飞刀回转中心的距离); f 为每转进给量; ε 为飞刀前端角。

由公式(2)可知,微结构表面的理论表面粗糙度与切削半径,每转进给量,飞刀前端角密切相关。减小进给量 f 和金刚石飞刀前端角 ε 或增大切削半径可以降低微结构表面的理论粗糙度。但是减小进给量会影响生产效率,所以在微结构的飞切加工中应该在加工空间允许的境况下尽量增大切削半径来减小微结构的表面粗糙度。

3 实验工作

3.1 精密机床

本实验所用的超精密机床是中国航空精密机械研究所研制的‘Nanosys-300’超精密复合加工系统。X 轴最大行程为 250 mm,定位精度为 0.4 $\mu\text{m}/250 \text{ mm}$,Z 轴最大行程为 150 mm,定位精度

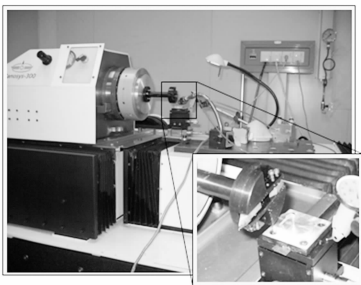


图 2 ‘Nanosys-300’超精密复合加工系统

Fig. 2 ‘Nanosys-300’ ultra-precision machining system

为 0.4 $\mu\text{m}/100 \text{ mm}$ 。空气主轴转速为 100 ~ 3 000 r/min。为了实现三维结构的加工,在其 X 轴安装手动精密升降台,如图 2 所示。

3.2 金刚石刀具

对于金刚石刀具的设计,由于金刚石具有脆性,故在保证获得较小加工表面粗糙度前提下,为了增强金刚石飞刀的强度,应采用尽可能小的前角,当加工材料为铝、铜、电解镍时,应选用前角 $\gamma = 0 \sim 5^\circ$ 。前角 γ 确定后,后角的大小决定着刀具的楔角,即刀具刃口的锋利程度,它由使用要求确定,一般为 $0 \sim 15^\circ$ 。根据微结构光学要求设计金刚石飞刀前角为 0° ,后角为 7° ,前端角为 68° ,刃口半径为 120 nm,磨制好的金刚石飞刀如图 3 所示。

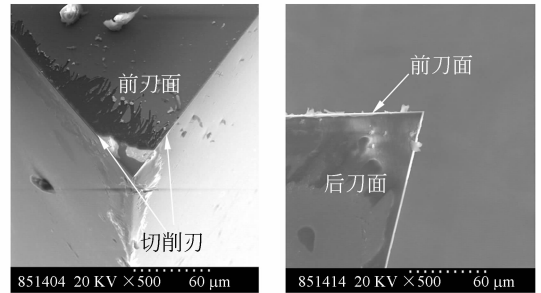


图 3 金刚石飞刀扫描电镜照片($\times 500$)

Fig. 3 SEM photos of diamond fly-cutting tool ($\times 500$)

3.3 实验设计

在加工实验中,用于微结构表面金刚石飞切加工的工件材料为聚碳酸酯 PC 和铝合金 LY12,工件尺寸为 $\varnothing 40 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。加工时使用航空煤油喷雾作为切削液,实验方案如表 1 所示。

表 1 实验方案

Tab. 1 Experimental conditions

	背吃刀量(μm)	5, 10, 20, 40
PC	进给量(mm/min)	5, 10, 20, 40
	主轴转速(r/min)	400, 600, 800, 1 000
	背吃刀量(μm)	2, 5, 10
LY12	进给量(mm/min)	5, 10, 20
	主轴转速(r/min)	800, 1 000, 1 200

3.4 表面检测实验

表面测试实验使用扫描电子显微镜对微结构表面进行成像分析,并且使用英国 Taylor Hobson 公司的 Form Talysurf PGI 1240 表面粗糙度

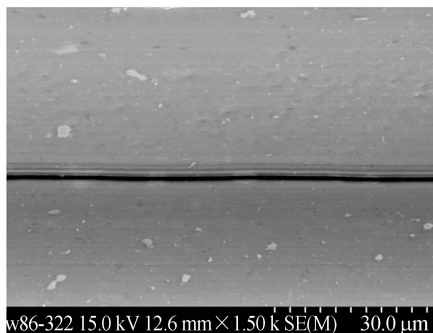
轮廓仪对加工后的微结构表面粗糙度和几何形状进行检测,Form Talysurf PGI 1240 表面粗糙度轮廓仪为接触式测量仪,功能强大,测量精度高,分辨率为 0.8 nm。

4 实验结果及分析讨论

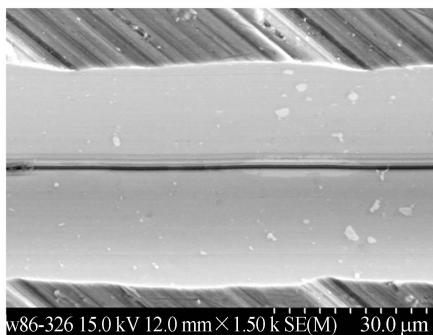
4.1 背吃刀量对微结构表面粗糙度的影响

背吃刀量 a_p 对微结构表面粗糙度 R_a 的影响如图 4 所示。切削 PC 时背吃刀量由 $5 \mu\text{m}$ 变化到 $40 \mu\text{m}$ 时,表面粗糙度值 R_a 的增加量不到 10 nm,这与总粗糙度相比不大。因此在加工 PC 时可以选用 $40 \mu\text{m}$ 的背吃刀量以提高加工效率。而切削 LY12 时,背吃刀量由 $2 \mu\text{m}$ 变化到 $10 \mu\text{m}$ 时,表面粗糙度值 R_a 由 259.5 nm 降低到 41.1 nm。这可能是因为飞切加工中背吃刀量是变化的,过小的背吃刀量更易引起切削过程中刀具刃口半径的相对增大,实际前角变为较大的负前角,在刀具刃口处产生相对较大的挤压摩擦作用,在被加工表面形成过程中会伴随着更多的塑性变形。而 LY12 为铝合金,由其材料特性引起加工表面形成过程中的塑性变形不均匀,从而引起表面粗糙度的下降。从图 5 的 SEM 照片中也可以发现,背吃刀量为 $10 \mu\text{m}$ 时加工的微结构表

面要明显好于背吃刀量为 $2 \mu\text{m}$ 时加工的微结构表面。



a) $a_p = 2 \mu\text{m}$



b) $a_p = 10 \mu\text{m}$

图 5 不同背吃刀量加工的微结构 SEM 照片(LY12)
Fig. 5 SEM photographs of micro-structure by different cut depths (LY12)

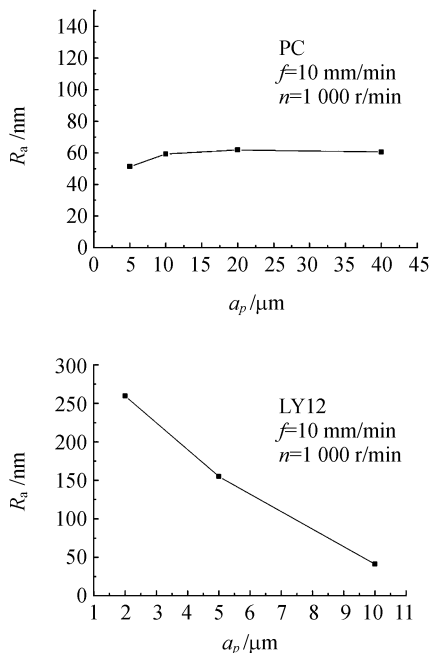


图 4 背吃刀量对表面粗糙度的影响

Fig. 4 Effect of cut depth on surface roughness

4.2 进给量对微结构表面粗糙度的影响

进给量对微结构表面粗糙度值 R_a 的影响如图 6 所示,从图中可以看出对于微结构的金刚石飞切加工,进给量对微结构侧表面质量影响较大。两种材料的表面粗糙度都有随进给量的增加而增加的趋势。切削 PC 时,进给量为 10 mm/min 时,表面粗糙度值最低;切削 LY12 时,进给量为 5 mm/min 时,表面粗糙度值最低。采用不同进给量加工在 LY12 上加工的微结构表面的 SEM 照片如图 7 所示。虽然小进给量会带来较好的表面质量,但是小进给量会增加加工时间。进给量越小,加工时间越长,加工成本也就越高。因此,在工业生产中,对于进给量的选择,既要考虑表面质量的要求,又要考虑经济效益。

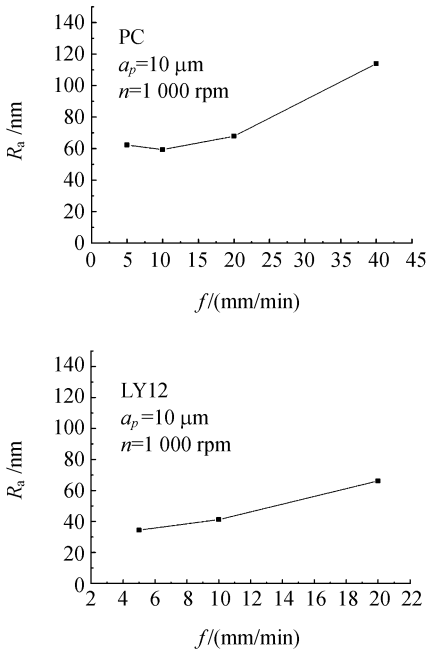
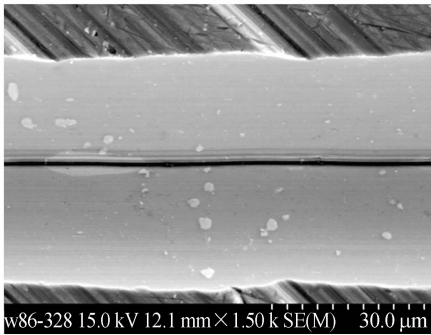
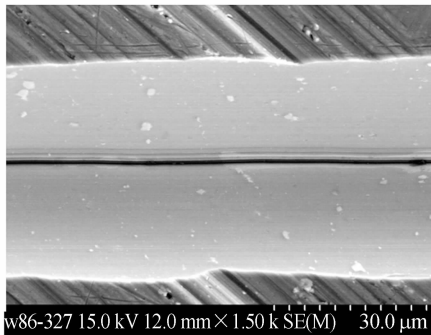


图 6 进给量对表面粗糙度的影响

Fig. 6 Effect of feed rate on surface roughness



(a) f=5 mm/min



(b) f=20 mm/min

图 7 不同进给量加工的微结构 SEM 照片(LY12)
Fig. 7 SEM photographs of micro-structure by different feed rates (LY12)

4.3 主轴转速对微结构表面粗糙度的影响

主轴转速对微结构表面粗糙度 R_a 的影响如图 8 所示,切削 PC 时,主轴转速在 400~1 000 r/min 之间变化所引起的表面粗糙度值的变化在 15 nm 以内,在 600 r/min 时粗糙度值最低。切削 LY12 时,主轴转速在 800~1 200 r/min 之间变化所引起的表面粗糙度值的变化也在 15 nm 以内,在 1 000 r/min 时粗糙度最低。可见主轴转速对两种材料的表面粗糙度的影响都不大。如图 9 为不同主轴转速下在 LY12 上加工的微结构的 SEM 照片,从微结构侧面形貌上看主轴转速为 1 200 r/min 时加工的微结构表面要略好于 800 r/min 时加工的微结构表面。

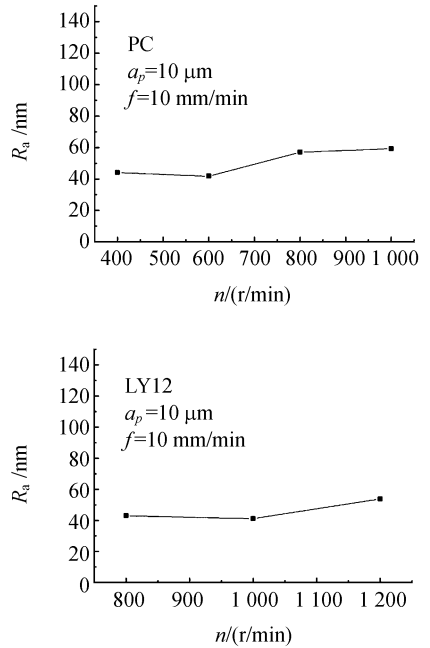
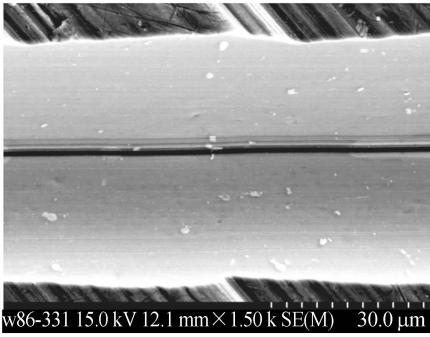


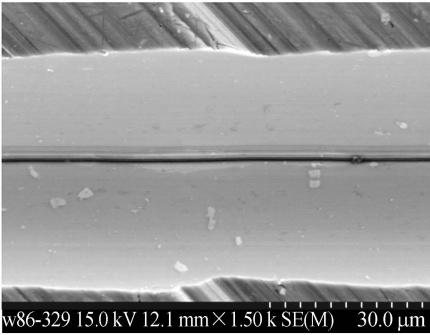
图 8 主轴转速对表面粗糙度的影响

Fig. 8 Effect of spindle speed on surface roughness

通过以上工艺实验,可知在加工 PC 时背吃刀量、进给量和主轴转速量分别为 5 μm , 10 mm/min 和 600 r/min 时 R_a 最小,而考虑到背吃刀量对 R_a 影响不大,为了提高加工效率,因此选用 40 μm 背吃刀量。加工 LY12 时,背吃刀量、进给量和主轴转速量分别为 10 μm , 5 mm/min 和 1 000 r/min 时 R_a 最小。因此,选用如表 2 所示工艺参数进行微结构加工。



(a) $n=800$ r/min



(b) $n=1\ 200$ r/min

图 9 不同主轴转速加工的微结构 SEM 照片(LY12)
Fig. 9 SEM photographs of micro-structure by different spindle speeds (LY12)

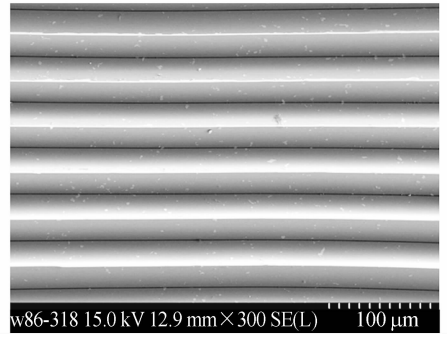
表 2 优化的工艺方案

Tab. 2 Optimum experimental conditions

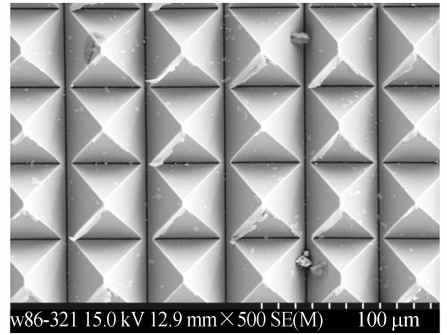
		PC		LY12	
	背吃刀量(μm)		40		
	进给量(mm/min)		10		
	主轴转速(r/min)		600		
	背吃刀量(μm)		10		
	进给量(mm/min)		5		
	主轴转速(r/min)		1 000		

实验是在材料 LY12 上加工微沟槽阵列和微金字塔矩阵。微沟槽夹角为 68° , 深为 $25\ \mu\text{m}$; 微金字塔矩阵高为 $50\ \mu\text{m}$, 宽为 $33.7\ \mu\text{m}$ 。加工时先采用较大加工参数进行粗加工, 以提高加工效率, 然后采用优化工艺参数进行精加工, 以提高微结构表面质量, 加工好的微沟槽阵列和微金字塔矩阵如图 10 所示。

从图 10(a)可以看出微沟槽阵列表面光滑; 沟槽底部结构清晰, 没有明显的过度圆弧; 沟槽顶部尖端没有明显的变形和毛刺产生; 阵列规整清



(a) $\times 300$



(b) $\times 500$

图 10 金刚石飞切加工的微结构的 SEM 照片(LY12)
Fig. 10 SEM photographs of micro-structures by diamond fly-cutting (LY12)

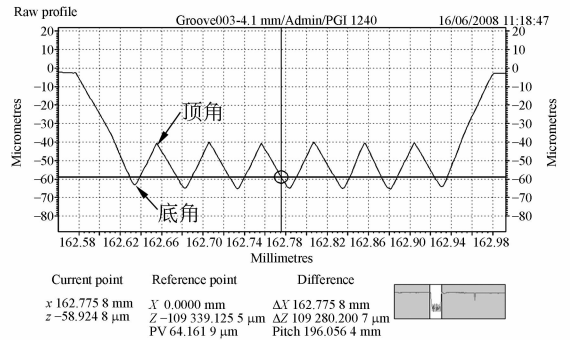


图 11 微沟槽的二维测量(LY12)

Fig. 11 Two-dimensional measurement results of V-groove array (LY12)

晰, 具有较好的一致性。使用 Form Talysurf PGI 1240 表面粗糙度轮廓仪对微沟槽阵列的几何形状进行二维检测, 如图 11 所示。微沟槽保持了较好的一致性, 平均深度偏差 $< 1\ \mu\text{m}$ 。微沟槽的底角半径 $< 1\ \mu\text{m}$, 顶角半径 $< 0.5\ \mu\text{m}$ 。表面粗糙度值为 $41\ \text{nm}$ 。

但是从图 10(b)的微金字塔矩阵 SEM 分析中发现,微金字侧面有较大的毛刺产生,并且在微金字塔的底部两条线没有完全相交,金字塔顶部不是一点而是一条线段。这是由于在加工微金字塔矩阵时需要做横向和纵向两次切削,工件的二次装夹使得两次切削深度不同,从而导致微金字塔的底部两条线之间存在偏差,使用高精度的旋转台就可以有效地避免此类现象的产生。

5 结 论

本文对金刚石飞切加工微结构表面的表面粗糙度进行了理论分析和实验验证,结果如下:

(1)微结构侧表面的理想表面粗糙度沿法线方向并没有变化,而沿进给方向存在着周期变化。减小进给量,减小金刚石飞刀前端角,或增大切削半径可以降低微结构面的理论粗糙度。

(2)研究了主轴转速、进给量以及背吃刀量等工艺参数对微结构表面粗糙度的影响。微结构表

面粗糙度随进给量的增加而增加,主轴转速对粗糙度值影响不大。切削 PC 时背吃刀量由 $5\ \mu\text{m}$ 变化到 $40\ \mu\text{m}$ 时,表面粗糙度值 R_a 的增加量不到 $10\ \text{nm}$,而切削 LY12 时,背吃刀量由 $2\ \mu\text{m}$ 变化到 $10\ \mu\text{m}$ 时,表面粗糙度值 R_a 由 $259.5\ \text{nm}$ 降低到 $41.1\ \text{nm}$ 。实验中 R_a 最好可达 $38\ \text{nm}$ (LY12)和 $43\ \text{nm}$ (PC)。

(3)实现了微沟槽阵列和微金字塔矩阵的金刚石飞切加工,加工出的微沟槽阵列表面光滑,表面粗糙度值为 $41\ \text{nm}$ 。底部结构清晰,没有明显的过度圆弧,底角半径 $<1\ \mu\text{m}$,顶部尖端没有明显的变形和毛刺产生,顶角半径 $<0.5\ \mu\text{m}$ 。阵列规整清晰,具有较好的一致性,深度偏差 $<1\ \mu\text{m}$ 。微金字塔矩阵底部两条线没有完全相交,加装高精度的旋转台可以有效地避免此类现象的产生。

后续工作是要研究金刚石飞切加工微结构表面时毛刺的产生机理和控制方案,以抑制毛刺的产生。

参考文献:

- [1] 蒋炳炎,吴旺青,彭华建,等. 注射成型参数对微结构阵列导光板翘曲量的影响[J]. 光学精密工程, 2007,15(11):1738-1744.
JIANG B Y, WU W Q, PENG H J, *et al.*. Effect of injection molding processing parameters on light guide plate with microstructure array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(11):1738-1744. (in Chinese)
- [2] 梁静秋,侯凤杰. 采用硅 V 型槽的一维光纤阵列的研制[J]. 光学精密工程, 2007,15(1):89-94.
LIANG J Q, HOU F J. One dimension optical fiber array with silicon V-grooves [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(1):89-94. (in Chinese)
- [3] 许文海,赵欢,芦永军. LED 阵列式紫外固化光源光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2007,15(7):1032-1037.
XU W H, ZHAO H, LU Y J. Design of an optical system for UV curing source with LED array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(7):1032-1037. (in Chinese)
- [4] AUTSCHBACH L, BRINKSMEIER E, PREUB W, *et al.*. Manufacturing of micro structured molds for an operating light system[J]. *HTM- Haer- terei-Technische Mitteilungen*, 2005, 60(3):183-189.
- [5] WECK M, HENNIG J, HILBING R. Precision cutting processes for manufacturing of optical components[J]. *SPIE*, 2001, 4440:145-151.
- [6] BENITEZ P, MINANO J C, HEMANDEZ M. On the analysis of microstructured surfaces [J]. *SPIE*, 2004, 5529:186-197.
- [7] DAVIES M A, EVANS C J, PATTERSON S R, *et al.*. Application of precision diamond machining to the manufacture of micro-photonics components [J]. *SPIE*, 2003, 5183:94-108.
- [8] WECK M, PFEIFER T, BRECHER C, *et al.*. Approach to a machine-integrated measurement and simulation tool for the manufacturing of ultra precise surfaces[C]. *Annals of the German Academic Society for Production Engineering, German*, 2005:133-136.
- [9] MORIWAKI T, SHIBASAKA T, SUZUKI H. Ultraprecision diamond cutting of steel by intermittent cutting[C]. *Proceedings of the 7th euspen international conference. Bremen, Germany*, 2007: 312-315.
- [10] REZAUR K M, RAHMAN, RAHMAN M, *et al.*. Micro grooving on electroless nickel plated

materials using a single crystal diamond tool[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006,27(9-10):911-917.

- [11] 李荣彬,杜雪,张志辉,等. 光学微结构的超精密加工技术[J]. *纳米技术与精密工程*, 2003,1(1):

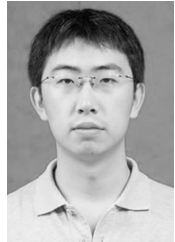
57-61.

LI R B, DU X, ZHANG ZH H, et al. . Ultra-precision machining of optical microstructures [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2003,1(1):57-61. (in Chinese)

作者简介:



赵清亮(1968—),男,河南新乡人,教授,博士生导师,德国洪堡学者,入选2007年度教育部新世纪优秀人才支持计划,1991年于北京理工大学获学士学位,1996年,1999年分别于哈尔滨工业大学获得硕士、博士学位,主要研究领域为超精密加工技术、硬脆和难加工材料的高效加工技术。E-mail: zhaqingliang@126.com



郭兵(1983—),男,吉林延吉人,博士研究生,2002年于吉林大学获学士学位,2006年于哈尔滨工业大学获硕士学位,主要从事微结构功能表面的金刚石飞切加工技术和微结构模具表面的超精密磨削与抛光加工研究。E-mail: 1983guobing@163.com



杨辉(1967—),男,浙江宁波人,研究员,1992年,1999年分别于哈尔滨工业大学获硕士、博士学位,主要从事超精密加工机理、超精密加工工艺、超精密加工设备基础元部件及其集成技术的研究。E-mail: yanghui303@gmail.com



王义龙(1981—),男,河北保定人,博士研究生,2005年于燕山大学获得学士学位,2007年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事精密、超精密切削加工技术的研究。E-mail: yilongwang@yahoo.cn

● 下期预告

被动锁模掺铒光纤激光器中的有理数谐波锁模

况庆强,桑明煌,聂义友,张祖兴

(江西师范大学 物理与通信电子学院,江西 南昌 330022)

为了获得稳定的谐波锁模脉冲,在分析光纤激光器的被动锁模技术的基础上,通过实验对被动锁模掺铒光纤激光器进行了相关研究。实验中除了观测到了稳定的谐波锁模脉冲外,还观察到了有理数谐波锁模脉冲的产生现象,分析其脉冲重复频率也证实此类脉冲序列具有属于3阶、5阶和6阶有理数谐波锁模脉冲序列重复频率的一样的规律。