

文章编号:1001-2486(2011)05-0054-05

光波导微模具飞切加工工艺*

彭文强,吴宇列,李圣怡,刘勇

(国防科技大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

摘要:针对目前模压制作工艺中高精度的光波导微模具加工工艺比较复杂的问题,基于金刚石超精密机械加工技术在光学元件微结构的广泛应用提出了光波导微模具的金刚石飞切高效快速的加工方法。通过超精密飞切加工系统以硬铝为模具材料进行了工艺优化的正交试验。试验结果表明:背吃刀量对光波导微结构表面质量的影响相当敏感,主轴转速对微结构表面质量的影响也比较大,进给量的影响则要小得多。综合考虑机床的稳定性及加工效率,确定了最优的光波导微模具的飞切加工工艺参数为:背吃刀量 $25\mu\text{m}$ 、进给量 $20\text{mm}/\text{min}$ 和主轴转速 $800\text{r}/\text{min}$ 。通过优化工艺参数获得微结构侧壁表面粗糙度 rms 为 17.1nm 的光波导微模具。

关键词:光波导;飞切;微模具;表面粗糙度

中图分类号:TH162.1 文献标识码:A

Optical Waveguide Microstructure Mould Made by Fly-cutting Technique

PENG Wen-qiang, WU Yu-lie, Li Sheng-yi, LIU Yong

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The fly-cutting technique has wide application in optical microstructure manufacture. A unique method is put forward to achieve fast and high quality optical waveguide microstructure mould manufacture with fly-cutting technique after an analysis of the present complicated process technique. Fly-cutting orthogonal test was conducted to get the optimal process parameters for machining the waveguide mould. It is found that the microstructure surface roughness is sensitive to the cut depth first, the next two are the spindle speed and the feed speed. The optimal process parameters involve such figures as cut depth of $25\mu\text{m}$, feed speed of $20\text{mm}/\text{min}$ and spindle speed of $800\text{r}/\text{min}$ through the experiment analysis considering the stability of the fly-cutting system and machining efficiency. The optical waveguide mold with microstructure surface root-mean-square roughness of 17.1nm was obtained through the optimal process parameters.

Key words: optical waveguide; fly-cutting; microstructure mould; surface roughness

为进一步提高效率,降低制造成本,基于聚合物光波导的可塑性、易加工性,一种新的采用微模具模压成型的光波导复制制造技术开始发展起来^[1-2]。基于微模具的光波导复制制造技术相对于传统光波导制造工艺效率高、性能高、工艺简单及制作成本低的优点。目前该技术已成为聚合物光波导的一个重要研究方向,但是目前该方法一个主要的问题是高精度的微模具制造比较困难。由于光波导尺寸比较小,而光波导器件与外部光纤对接耦合的精度又要求比较高,需要达到亚微米级,因此微模具本身的制造精度要求很高,微模具尺寸误差会直接影响光波导器件性能。目

前微模具一般都是采用光刻、反应离子刻蚀、深反应离子刻蚀、LIGA 技术、电子束刻蚀等^[3-5]微电子加工技术加工而成的,其制造过程比较复杂、制造设备也比较昂贵,并且制造精度比较差,只能达到微米级精度,同时一致性也比较差,对高深宽比微模具的加工也比较困难。在微光学元件制造方面,最近一种新超精密单点金刚石切削加工方法逐渐发展起来,并开始在微光学元件的加工中逐渐得到应用。金刚石飞切加工作为一种高效的超精密机械加工技术,与其它金刚石加工方法相比能加工出比较复杂的表面结构,尤其是对线性微槽结构和由多条相交线组成的微槽结构阵列,金

* 收稿日期:2011-03-05

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50735007)

作者简介:彭文强(1984—),男,博士生。

刚石飞切加工都能起极其重要作用。光波导作为一种线性微槽结构非常适合于金刚石飞切加工技术,利用飞切加工技术在模具基体材料上直接加工出光波导微结构,从而快速、高精度地实现微模具的制造。利用该模制工艺技术已成功实现聚合物光波导条的制作^[6]。

由于制作模具中的光波导微结构的表面粗糙度会严重影响最终制作光波导器件的性能,因此本文以光波导微结构侧壁粗糙度为品质衡量指标,对光波导微模具的飞切加工工艺进行研究。

1 微模具飞切加工理论分析

金刚石飞切加工属于单刀、断续加工方式,金刚石刀具随飞刀盘每旋转一周,刀具与工件只接触一次,同时在每次的切削过程中切深又随着飞刀盘的旋转角度不断变化,刀具相对于工件成摆线类运动。金刚石飞切加工几何模型如图1所示。

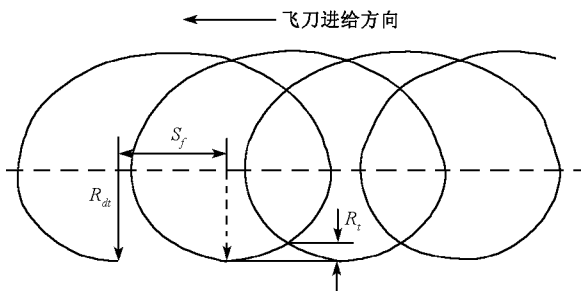


图1 飞刀加工过程中刀尖的运动轨迹
Fig.1 The tool path in the fly-cutting process

飞切加工过程中,存在许多干扰使得刀具偏离预定的路径,影响已加工表面形貌的主要因素包括切削刃的形状、进给量、主轴转速、飞刀旋转半径以及刀具与工件间的相对振动等。理想状态下,进行超精密金刚石飞切加工时,在加工表面形成轮廓峰和轮廓谷,它们之间的距离就是理论残留高度或者称作理论粗糙度,如图1的 R_t 。如果考虑主轴转速、进给量以及吃刀深度等因素影响,飞刀表面粗糙度可用以下解析式表示^[7]:

$$R_t = R_d - \sqrt{R_d^2 - f^2/4n^2}$$

式中: R_t 为理论粗糙度(mm);

R_d 为飞刀旋转半径(mm);

f 为工件进给量(mm/min);

n 为主轴转速(r/min)。

根据飞切建模解析表达式,考虑主轴转速、进给量以及飞刀旋转半径对表面质量的影响,利用MATLAB对梯形金刚石刀具进行三维仿真加工,仿真加工结果如图2所示。

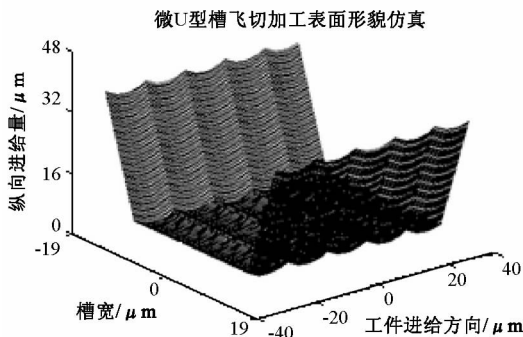


图2 光波导微结构飞切加工的形貌仿真
Fig.2 Simulation of the optical waveguide microstructure fabricated by fly-cutting

通过仿真分析发现主轴转速越大,进给量越小,飞刀旋转半径越长,得到的光波导微结构表面质量越高。如果选择合适的切削参数,可以控制光波导表面粗糙度在纳米级精度范围内,满足微模具对精度的要求。但是主轴转速太大,离心力越大,主轴偏心严重,主轴的动平衡难以控制,进给量太小,又会影响切削效率,同时机床振动环境也对光波导微结构表面质量有很大影响,因此必须结合具体工艺试验对飞切加工工艺进行优化研究。

2 微模具飞切加工工艺试验

2.1 光波导微结构加工刀具

根据制作光波导结构特点,设计加工用飞刀为梯形截面金刚石刀具。该金刚石梯形刀为对称结构,共有3个切削刃,故有3个后刀面。前角为 0° ,3个后角为 6° ,刀具刃口半径小于 $1\mu\text{m}$ 。磨制的梯形截面金刚石刀如图3所示。利用该刀具对光波导微结构的仿真加工效果如图2所示。

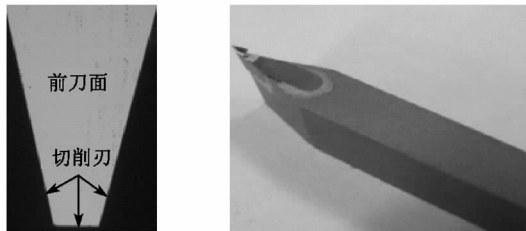


图3 微模具飞切加工金刚石刀具
Fig.3 Diamond tool used in micro-mould fabrication

2.2 飞切加工系统

根据理论分析及基于实验室的超精密车床,构建了一套光波导微结构的飞切加工系统,实现了光波导微结构的快速高精度加工。飞切加工系统中机床各轴的定位精度可以达到亚微米级。飞切系统搭建:超精密机床+飞刀架+微动平台。构建的光波导微模具飞切加工系统如图4所示。

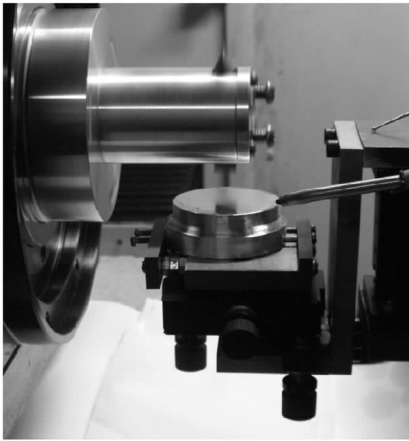


图4 飞切加工系统
Fig.4 Fly-cutting system

2.3 正交实验设计

本文以梯形光波导侧壁的表面质量为品质衡量指标,侧壁表面质量越好,则获得光波导微模具的性能越高。侧壁表面质量通过接触式轮廓仪 Form Talysurf PGI 1240 进行测量,测量精度高,纵向分辨率为 0.8nm。为研究梯形金刚石刀具飞切加工工艺参数对光波导微模具表面质量的影响,实验选取主轴转速、进给量以及背吃刀量等 3 个可控制的工艺参数作为实验因子。各实验因子各选取 4 个水平。飞切加工正交实验的模具基体材料选择具有良好机械加工性能的硬铝 LY12。铝模飞切加工实验各因子的水平如表 1 所示。

表 1 飞切加工参数及参数水平

Tab.1 Fly-cutting process parameters and the levels

因子	背吃刀量	进给量	主轴转速
	(μm)	(mm/min)	(r/min)
	A	B	C
1	5	5	400
2	10	10	600
3	20	20	800
4	30	30	1000

根据飞切加工工艺参数和参数水平的数量选择 $L_{16}(4^3)$ 正交表,其实验方案如表 2 所示。

3 实验结果及分析讨论

3.1 实验结果及分析

利用接触式轮廓仪测得表 2 实验方案各组实验中铝模上的光波导微结构侧壁表面粗糙度,求出各加工参数水平的平均以及各参数水平之间的极大值与极小值的差值,并对极差由大到小进行排序,可得到各参数对铝模上光波导微结构表面粗糙度影响程度的排列顺序,如表 3 所示。

表 2 飞切加工实验方案

Tab.2 Scheme of fly-cutting process

实验号	A 背吃刀量 (μm)	B 进给量 (mm/min)	C 主轴转速 (r/min)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	2	1	4
6	2	2	1
7	2	3	2
8	2	4	3
9	3	1	3
10	3	2	4
11	3	3	1
12	3	4	2
13	4	1	2
14	4	2	3
15	4	3	4
16	4	4	1

表 3 各飞切参数不同水平因素的影响表

Tab.3 The influence of process parameter levels

	背吃刀量	进给量	主轴转速
水平 1	24.35 nm	24.53 nm	30.58 nm
水平 2	32.14 nm	22.51 nm	24.67 nm
水平 3	23.65 nm	24.81 nm	23.76 nm
水平 4	17.32 nm	25.62 nm	18.44 nm
极差	14.82 nm	3.11 nm	12.14 nm
排序	1	3	2

比较表 3 中各加工参数水平的差值可知,如果固定其它工艺参数,单独考虑背吃刀量的影响,则在背吃刀量为 $30\mu\text{m}$ 时,获得的光波导微结构表面质量最优。同理在固定其他工艺参数,单独考虑进给量和主轴转速的影响,则在进给量为 $10\text{mm}/\text{min}$,主轴转速为 $1000\text{r}/\text{min}$ 时,获得的光波导微结构表面质量最优。由此可以得到该组参数最佳组合为: $A_4B_2C_4$ 。通过对参数水平的极差排序比较可知,各参数对模具光波微结构表面质量的影响程度为:背吃刀量 > 主轴转速 > 进给量。

3.2 背吃刀量对微结构表面质量的影响

背吃刀量对光波导微结构表面质量的影响如图5所示。从图中可以看出对光波导微结构进行加工时背吃刀量由 $5\mu\text{m}$ 变化到 $10\mu\text{m}$,微结构表面粗糙度随着背吃刀量的增加而增加,这可能是受梯形金刚石刀刃口半径的影响,由于设计的梯形金刚石刀刃口半径在 $1\mu\text{m}$ 左右,过小的背吃刀量容易引起切削过程刀具的刃口半径相对增大,实际前角变为较大的负前角,在刃口半径处产生相对较大的摩擦作用,在被加工表面形成过程中产生更多的塑性变形,造成表面质量变差。当背吃刀量超过 $10\mu\text{m}$ 时,随着切削深度的增加,刀具的切削刃口半径相对减小,刃口变得相对锋利,相对切削力减少,获得的表面质量进一步提升。因此在加工微模具时可以选用大的背吃刀量以提高工作效率。由于较大的背吃刀量在加工过程中会对刀具产生较大冲击,对刀具寿命产生很大影响,因此不能选择过大的背吃刀量。

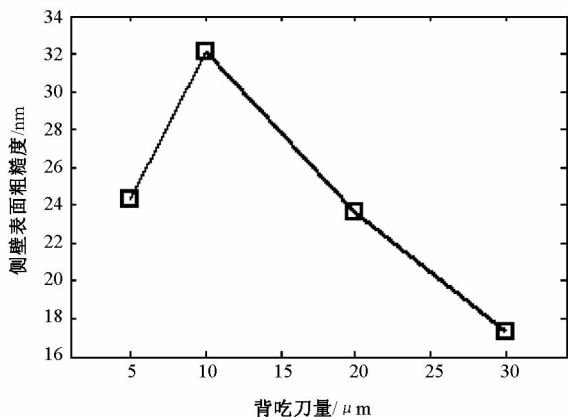


图5 背吃刀量与表面粗糙度的关系图

Fig. 5 Relation between the cut depth and surface roughness

3.3 进给量对微结构表面质量的影响

进给量对光波导微结构表面粗糙度的影响如图6所示。从图可以看出,进给量在 $5\sim 30\text{mm}/\text{min}$ 变化时,光波导微结构表面粗糙度的变化量不到 4nm 。因此可以看出梯形金刚石刀对光波导微模具进行飞切加工时进给量对微结构表面质量的粗糙度影响不大。在进给量为 $10\text{mm}/\text{min}$ 时,微结构表面粗糙度达到最小值 22.51nm 。进给量虽然对微结构的表面粗糙度影响不大,但会影响飞切加工时间,影响加工效率。

3.4 主轴转速对微结构表面质量的影响

主轴转速对光波导微结构表面粗糙度的影响如图7所示。从图可以看出,主轴转速在 $400\sim 1000\text{r}/\text{min}$ 变化时,随着主轴转速的增加,微结构

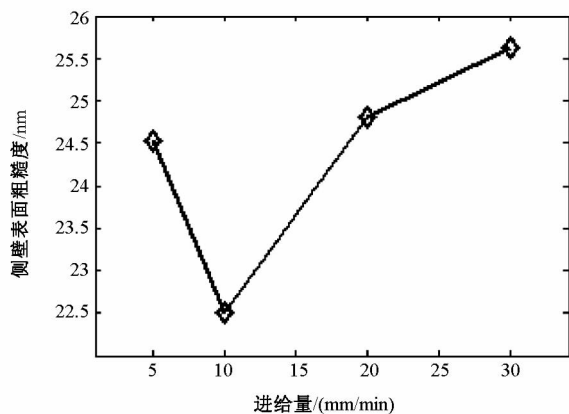


图6 进给量与表面粗糙度的关系图

Fig. 6 Relation between the feed speed and surface roughness

的表面质量明显提升,与理论分析一致,在 $1000\text{r}/\text{min}$,获得最小的表面粗糙度 18.44nm 。因此在对光波导微模具进行飞切加工过程中为了获得比较理想的表面质量,可以采用较高的转速。但在实际加工过程中,较大的转速会对主轴的动平衡产生较大的影响,因为主轴转速越大,离心力越大,主轴的动平衡难以控制,影响飞切加工系统正常工作,因此必须控制主轴转速过大对加工系统造成的不利影响。

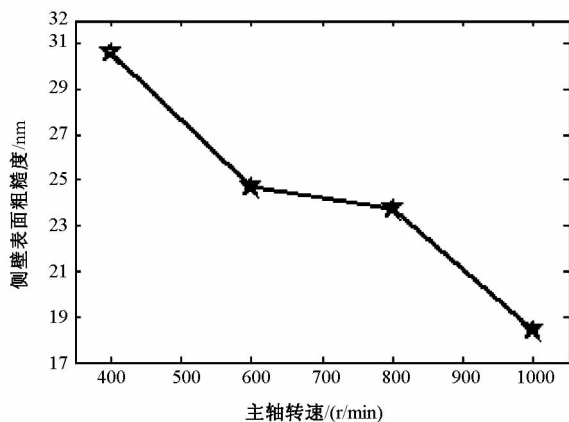


图7 主轴转速与表面粗糙度的关系图

Fig. 7 Relation between the spindle speed and surface roughness

由于优化设计的光波导微结构的尺寸为 $65\times 38\times 50$ (上底 \times 下底 \times 高(单位: μm)),综合考虑系统的稳定性、加工效率及飞切加工刀具的使用寿命,得到优化的飞切工艺参数为:背吃刀量 $25\mu\text{m}$ 、进给量 $20\text{mm}/\text{min}$ 和主轴转速 $800\text{r}/\text{min}$ 。在优化工艺参数下加工的微光波导模具如图8所示,由图可知铝模上的光波导微结构整体结构一致,轮廓清晰,经过轮廓仪测量光波微结构的表面平均粗糙度的rms值为 17.1nm 。

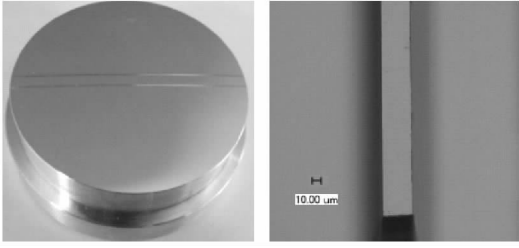


图8 光波导微模具及其微波导结构

Fig.8 Waveguide mould and the microstructure on the mould

4 结论

针对光波导微模具制作比较困难、工艺相对复杂的特点,提出了基于超精密机械加工的飞切加工工艺。通过理论分析确定了该工艺对光波导微模具加工的可行性及不同工艺参数对微结构表面质量的影响。通过正交飞切实验确定了不同工艺参数对光波导微结构表面质量的影响关系:背吃刀量 > 主轴转速 > 进给量。分析了背吃刀量、主轴转速及进给量对光波导微结构表面质量的影响关系。综合考虑飞切系统的稳定性及加工效率选择了最优的飞切加工工艺参数为:背吃刀量 $25\mu\text{m}$ 、进给量 $20\text{mm}/\text{min}$ 和主轴转速 $800\text{r}/\text{min}$ 。

通过优化的工艺参数获得了一致性好、轮廓清晰光波导微结构,最终得到的侧壁表面粗糙度的 rms 值为 17.1nm 。

参考文献:

- [1] Stefan K, Andreas N. Precision Moulding Technique for Optical Waveguide Devices [C]//Proceedings of SPIE, 1997, 3135: 2-11.
- [2] Okihiro S, Naomichi O. Polymeric Waveguide Fabrication Based on Mold Technology [C]//Proceedings of SPIE, 2003, 4991: 366-373.
- [3] Jin T K, Choon G C, Hee K S. Polymer Planar Lightwave Circuit Type Variable Optical Attenuator Fabricated by Hot Embossing Process [J]. ETRI Journal, 2005, 27(1): 122-125.
- [4] Toshikuni K. Fabrication of Polymeric Optical Waveguides Using Simple Method [C]// Proceedings of SPIE, 2004, 5595: 92-97.
- [5] Weng Y J, Weng Y C, Wong Y C, et al. Fabrication of Optical Waveguide Devices Using Electromagnetic Assisted Nanoimprinting [C]//2009 International Conference on Signal Processing Systems. 2009: 910-912.
- [6] 彭文强, 吴宇列, 刘勇. 聚合物波导条的超精密注塑制作 [J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(3): 5-8.
- [7] 刘勇, 吴宇列, 李圣怡. 基于普通车床的微 V 型槽飞切装置分析与设计 [J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(4): 1-4.