

文章编号 1004-924X(2017)12-2986-08

玻璃模压成形用微沟槽磷化镍模具 的超精密切削加工

董晓彬, 周天丰*, 庞思勤, 阮本帅, 王西彬
(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要:最佳邻接量是高精度加工玻璃模压成形用磷化镍镀层材料微沟槽模具的重要参数。本文提出了一种利用小角度微沟槽交叉切削技术快速确定微沟槽最佳邻接量极限范围的方法。该方法利用沟槽小角度交叉切削材料去除形式与沟槽邻接切削相近的特点,对微沟槽邻接量的极限范围进行预测。首先,以沟槽交叉角度和交叉沟槽深度为变量设定切削条件,得到多组渐变棱;然后,观测交叉渐变棱形貌并结合材料塑性变形法则与脆塑转变理论分析棱边上的材料去除状态;通过观察交叉渐变棱与沟槽邻接脊部在切削过程中去除材料的截面形貌建立二者的关系;最后,分析交叉渐变切入棱与切出棱形貌的差异,确定脆塑转变的邻接量范围。基于上述方法,观测了交叉渐变棱的形貌并进行几何计算,确定磷化镍模具微沟槽邻接切削产生脆性剥离现象的临界邻接量范围为 570~720 nm。利用微沟槽模具超精密切削加工实验验证了该方法的有效性,加工出了高质量模具并用于微沟槽玻璃模压成形,实现了玻璃微沟槽的精密制造。

关键词:模具制造;磷化镍镀层;微沟槽切削;脆塑转变;模压成形

中图分类号: TG506; TQ171.684 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172512.2986

Ultraprecision microgroove machining of nickel phosphorous plating mold for glass molding

DONG Xiao-bin, ZHOU Tian-feng*, PANG Si-qin,
RUAN Ben-shuai, WANG Xi-bin

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: zhoutf@bit.edu.cn

Abstract: The optimal adjacent amount range is an importance parameter in ultra precision microgroove machining of nickel phosphorous (Ni-P) plating mold for glass molding. This paper proposes a method by using small cross angle microgroove cutting to test the optimal adjacent amount range in the process of single point diamond cutting of microgrooves rapidly. In this method, the limits of the adjacent amount range is forecasted based on the similarity of the material removal form between the small cross angle microgroove cutting and the adjacent microgroove cutting. Firstly, the cross angle and microgroove depth are set as the microgroove cutting variables to perform experiments and to obtain several pairs of arrises. Then, the material removed state is analyzed based on the plastic deformation law and brittle-ductile transition theory through the observation of the gradient arrises. The sec-

收稿日期: 2017-05-22; 修订日期: 2017-06-26.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2015CB059900); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51375050)

tion of removed material in gradient arris machining process is analyzed and compared with that of adjacent microgrooves, and their relationship is established. Finally, the differences between the exit arrises and the entrance arrises are analyzed and the adjacent amount range of the brittle-ductile transition area is determined. According to this method, the arris morphology is observed and calculated, it is found that the critical adjacent amount range of the brittle dissection phenomenon is 570—720 nm in ultra precision microgroove machining of nickel phosphorous (Ni-P) plating mold. The feasibility of the method is verified by ultraprecision machining of the brilliant microgroove mold. The mold is put into service in glass molding process and high precision optical glass microgrooves are manufactured.

Key words: mold manufacturing; nickel phosphorous plating; microgrooves cutting; brittle-ductile transition; glass molding

1 引 言

光学玻璃微沟槽阵列具有降低光反射率、提高透射率和衍射效率以及控制光能谱分布等功能,是光电系统中重要的元器件^[1]。光学微沟槽用于液晶显示屏幕背光板可以生成优异的影像特征,具有极高的衍射效率^[2];在太阳能接收器件光学结构中加入三角形微沟槽能够提高使用效率和半导体器件的出光效率^[3]。传统的玻璃微沟槽加工方法有 MEMS 刻蚀、高能束加工以及微切削加工等,其中高能束加工以激光加工、离子束加工和电子束加工为代表。

玻璃材料在室温下所表现出的脆硬性使得光学玻璃微沟槽的直接加工具有较高难度。玻璃微沟槽模压制造方法通过将玻璃加热至一定温度使其软化,施加精确的压力将模具表面的微沟槽形貌复制到玻璃表面,之后退火冷却脱模,在玻璃表面生成微沟槽结构。相对于传统方法,玻璃模压成形技术具有精度高、一致性好、效率高、成本低等优点,适合大批量生产^[4]。国内外的学者已经对该技术开展了一定的研究,Ryuichi Kobayashi 加工出微沟槽阵列用于模压试验,并结合仿真研究了微沟槽尺寸对成形结果的影响^[5]。解加庆等对模压成形过程的玻璃-模具界面摩擦模型以及玻璃高温黏弹性本构模型展开研究,得到了微沟槽成形的应力分布规律^[6]。

在模压过程中玻璃表面的形貌由模具复制而来,因此制造高精度的耐用模具成为模压成形过程的关键。本课题组在研究中综合考虑模具的性能要求与加工条件,选用磷化镍(Ni-P)镀层作为模具材料进行微沟槽加工,并利用该模具进行了

微沟槽模压成形试验^[7]。在进一步研究中,我们通过热处理使镀层材料晶化,进行理论与试验分析后发现,制得的晶态磷化镍 Ni-P 模具有着更加广泛的应用前景^[8]。使用单点金刚石超精密切削技术可以高质量、高效率的进行模具表面微沟槽结构的精密制造。Takashi Oowada 等在 Ni-P 的切削研究中通过分步切削法提高了沟槽质量,并以试验与仿真相结合的方式进行了理论分析^[9]。Fang F 等通过对单晶硅的超精密切削试验探索了刀具切削刃半径对最小未变形切屑厚度和材料脆塑性去除的影响^[10]。Yan J 等利用透射电子显微镜观察了斜切试验所形成的单晶硅表面的损伤层,观察到了单晶硅表层的相变层以及位错层,得出了材料脆性破坏机理与加工压力相关的结论^[11]。斜切试验研究对微切削脆塑性去除与未变形切屑厚度的关系进行了一定程度上的探索,然而对于一些特定的加工状态,斜切试验不够直观有效,为加工过程提供的依据有限。微沟槽模具加工过程中沟槽间相互邻接,材料去除量随邻接距离的变化而变化,对脆塑性去除状态产生影响,去除材料形状较复杂,有别于一般的切削加工。针对这一问题,本文利用沟槽小角度交叉切削材料去除形式与沟槽邻接切削相近的特点,对微沟槽邻接量的极限范围进行预测,以获得高质量的微沟槽模具。

2 模具超精密切削加工及脆塑转变

2.1 微沟槽模具超精密切削加工

根据玻璃模压加工条件,模具材料选用晶态 Ni-P 镀层,微沟槽模具的超精密切削加工在美国 AMETEK 公司的 Nanoform X 纳米轮廓加工系

统上完成,加工过程如图 1 所示。通过真空吸盘将模具固定,刀具采用刀尖角度为 90° 、刃口圆弧半径为 100 nm 的锋锐金刚石车刀。刀具在模具表面水平划过,完成单个沟槽的切削,之后将刀具在竖直方向移动沟槽间距,重复加工,完成微沟槽模具的整体制造。

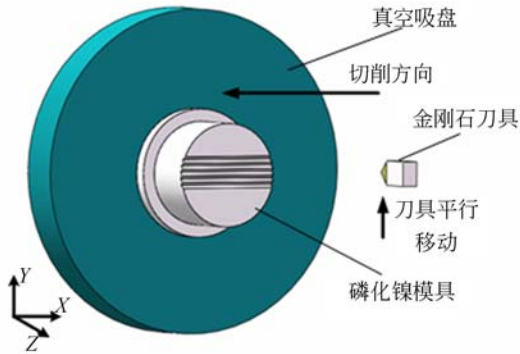


图 1 微沟槽模具单点金刚石切削

Fig. 1 Single point diamond cutting of microgrooves on mold

在加工过程中,为得到微沟槽脊棱尖锐的高质量模具,两相邻沟槽间需要邻接,如图 2 所示。此时最终加工得到的沟槽阵列深度由沟槽间距决定,与刀具的实际切削深度无关。 90° 金刚石刀具加工所得的沟槽深度为沟槽间距的一半。在切削过程中,若两沟槽间距过小,沟槽邻接量大于某一值时,沟槽脊部的材料去除过程发生脆性断裂,材料剥离形成凹坑。图中阴影部分为邻接切削所去除截面的形状。

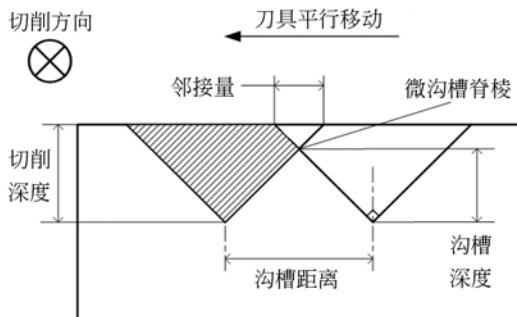


图 2 微沟槽切削邻接量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of adjacent amount of microgrooves cutting

2.2 晶态磷化镍超精密切削脆塑转变

晶态材料塑性变形源于材料的位错运动,微观尺度下的变形方式与宏观尺度下存在显著差异,具有明显的尺度效应。晶体材料塑性变形的内部位错分为简单拉伸、压缩变形位错随机捕获所产生的“统计储存位错”,以及材料剪切、弯曲载荷作用下与形状改变协调的“几何必需位错”^[12]。几何必需位错是晶体材料在微观尺度塑性变形的主要原因,尺度效应是塑性域切除加工的必要条件。V. Madhavan 等在研究中引入纳米压痕试验,确定压头下变形处的几何必需位错密度^[13]为:

$$\rho_G = \frac{3n}{2bh} \tan^2 \theta, \quad (1)$$

式中: n 为位错数量, h 为印压深度, b 为博格斯矢量, θ 为压头包角。

通过切削与纳米压痕加工相似性的比对可得:在切削过程中,随着切削厚度的增加,几何必需位错密度减小,位错密度较低,不足以产生塑性滑移变形,此时形成裂纹等破坏。破坏延伸至刀尖下方材料并在刀具作用下进一步扩大,切削材料以脆性方式断裂。

3 磷化镍材料微沟槽脆塑转变邻接量预测

3.1 小角度微沟槽交叉切削

为研究材料去除过程中脆塑转变发生时两沟槽间的邻接量,设计了小角度微沟槽交叉切削试

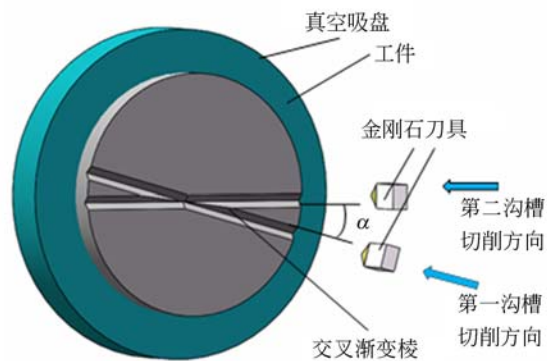


图 3 小角度微沟槽交叉切削加工过程示意图

Fig. 3 Machining process of small cross angle microgrooves

验。试验同样在 Nanoform X 纳米轮廓加工系统中进行,如图 3 所示。在完成单个沟槽切削加工后,将用于固定工件的主轴转过一不大于 10° 的角度,再次进行微沟槽切削加工,此时两次加工生成的沟槽交汇处形成两个渐变的棱边。通过观测渐变棱边形貌以及分析棱边加工材料的去除过程,建立交叉切削与沟槽邻接加工二者的联系。根据表 1 中参数进行切削加工,改变沟槽交叉角度与第二条相交沟槽的深度,以进行对比。

表 1 小角度微沟槽交叉切削加工参数

Tab. 1 Experiment parameters of small cross angle microgroove cutting

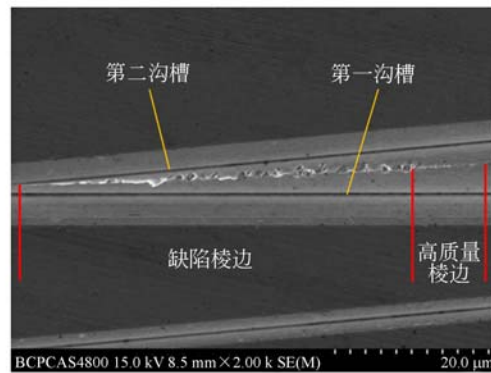
切削速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	第一沟槽	第二沟槽	沟槽交叉 角度 $\alpha/(\circ)$
	深度 $d_1/\mu m$	深度 $d_2/\mu m$	
2 400	3	3, 1.5	2, 5, 8, 10

3.2 交叉棱整体形貌

图 4 为交叉角度为 5° 、沟槽深度均为 $3 \mu m$ 的两沟槽切削加工后所形成的渐变棱的电子扫描显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)照片和依照观测结果得到的示意图。由图可知,渐变棱整体可分为上部的高质量棱边和底部缺陷棱边两部分。棱边缺陷类型主要有底部的毛刺和靠近上部的脆性凹坑,其中脆性凹坑与高质量棱边相连,可以判定在切削加工由高质量棱边向缺陷部分过渡的过程发生了材料的脆塑性转变。

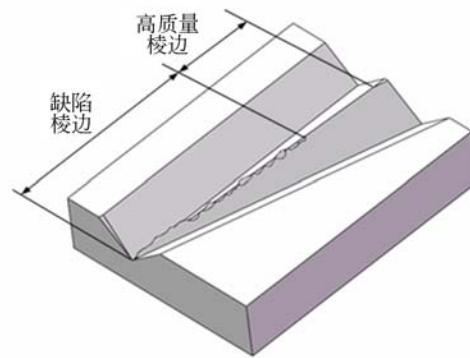
交叉切削第二条相交沟槽的切除部分形状如图 5 所示,图中标注了渐变棱的生成位置,并得到了与高质量棱边部分和脆性缺陷凹坑部分对应的截面形状。比对后发现,两处截面在棱边处所对应材料的去除厚度存在差异,当厚度达到一定范围,根据脆塑转变位错理论,位错密度处于较低范围无法使材料滑移变形,材料表层萌生微裂纹;并且随着切削的进一步进行,微裂纹扩展,在材料流动与脆塑转变机理的共同作用下材料在去除表面棱边附近发生脆性剥离。

为确定棱边处的材料去除厚度在渐变棱脆塑性形貌形成中的作用,对相同交叉角度下 $1.5 \mu m$ 沟槽与 $3 \mu m$ 沟槽交叉形成的渐变棱进行 SEM 观测,如图 6 所示。由图可知,在棱长度减小的前提下,棱边的高质量区域长度并未依棱长度的变



(a) 交叉棱 SEM 照片

(a) SEM photograph of arris



(b) 交叉棱整体示意图

(b) Overall schematic of arris

图 4 交叉棱整体形貌

Fig. 4 Morphology of small cross angle microgroove arris

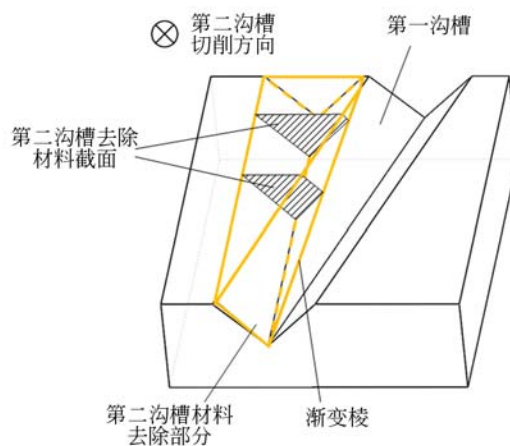


图 5 交叉切削第二沟槽切除部分示意图

Fig. 5 Schematic of second cutting part in small cross angle microgroove

化幅度产生改变,而是与图 4(a)中的长度相近;另一方面形成脆性凹坑的区域明显变小,且凹坑

尺寸也相应变小。由于脆性凹坑是深度渐变的，凹坑深度使得其边缘区域的切削厚度相对减小，在切削厚度较小的情况下，凹坑边缘材料厚度易向塑性去除区域过渡，以塑性方式去除形成较小凹坑。所以，渐变棱上脆塑性加工的转变与棱边处对应材料的去除厚度相关。

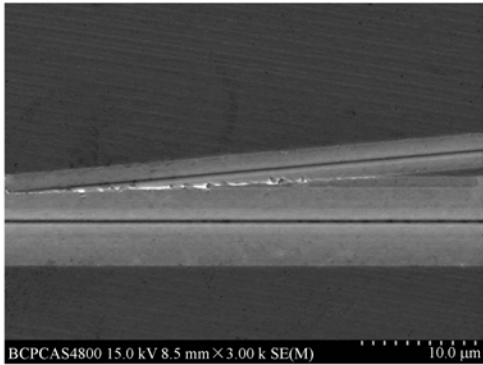


图 6 1.5 μm 交叉棱 SEM 照片

Fig. 6 SEM photograph of arris at depth of cut of 1.5 μm

对比图 5 与图 2，交叉切削去除部分材料的截面形状与邻接切削去除截面类似，切削过程中材料的变形机理相近。通过几何计算方法求解图 7 所示的棱边角度，即图中两标记平面夹角 β ，结果如表 2 所示。在实验所设的几个交叉角度下，棱边角度随交叉角度 α 的增大而增大，最大差值不超过 0.5° ，可近似将交叉切削所得的棱边视为 90° 棱，因此，在试验所涉及交叉角度下，认为交叉切削与邻接切削去除的材料具有相同的截面形状。

表 2 沟槽交叉角度与交叉棱角度的关系

Tab. 2 Relationship between cross angle and arris edge angle (°)

沟槽交叉角度 α	交叉棱角度 θ
2	90.017 45
5	90.109 01
8	90.278 80
10	90.435 23

3.3 脆塑转变邻接量预测

沟槽交叉切削得到切入、切出棱总体形貌分布相同，均由上部高质量棱边区域和底端缺陷区域组成，区别在于切入棱的材料去除状态由塑性向脆性转变，而切出棱相反。图 8 为两 8° 交叉的

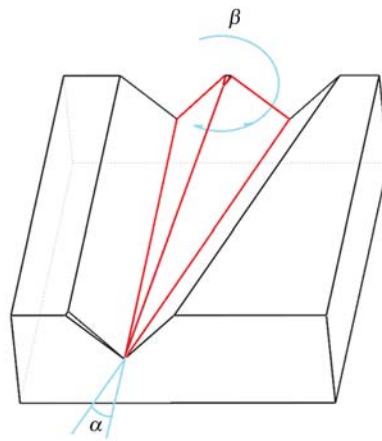
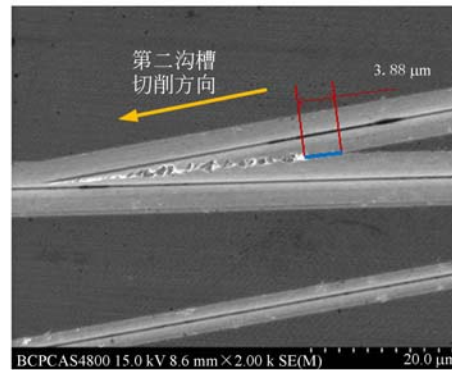


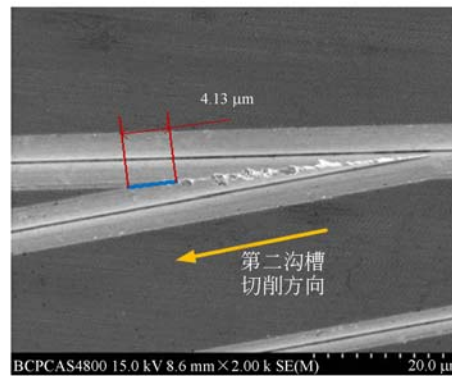
图 7 交叉棱边角度示意图

Fig. 7 Schematic of edge angle of arris



(a) 切入棱 SEM 照片

(a) SEM photograph of entrance arris



(b) 切出棱 SEM 照片

(b) SEM photograph of exit arris

图 8 切入棱切出棱形貌对比

Fig. 8 Comparison of relative arrises

$3 \mu\text{m}$ 沟槽的切入棱与切出棱，比对后发现，切出棱上脆性剥离区域尺寸较小，且脆性凹坑尺寸小于切入棱上的凹坑尺寸。同时，根据图中测量距

离可知,切出棱上质量较优区域范围大于切入棱。对试验数据进行处理和分析,得到切出棱形貌总体优于切入棱。

受切除角度微小变化以及棱形成方向的共同作用,切出棱材料的切除过程中刀具对材料产生静水压力作用,一定程度上对材料裂纹和脆性剥离起到抑制作用,所以形成凹坑范围窄且尺寸较小;切入棱材料的去除过程中由于刀具与材料加工表面的夹角略微大于 90° ,切屑对表面未加工材料产生拉应力,同时刀具与材料间存在黏滞力,此时材料的去除过程比邻接切削更容易产生脆性剥离,所以总体质量比切出棱差。根据以上理论可以推断,在相同切除截面的前提下,切出棱形貌最好,其次为邻接切削棱,切入棱最差。因此,在预测脆塑转变邻接量时可将其测得切出棱脆塑转变部分对应的邻接量设为上界,将切入棱测得值设为下界。

脆塑转变邻接量的建模计算结果见图 9。由图可以看出,不同交叉角度所得到的结果分布均匀,4 组数据相近且无渐变态势,可见在实验所选定的交叉角度范围,棱角度微小变化对结果没有影响,模型可信。根据实验结果预测镀层材料脆性剥离开始发生的微沟槽邻接切削量为 $570 \sim 720 \text{ nm}$ 。

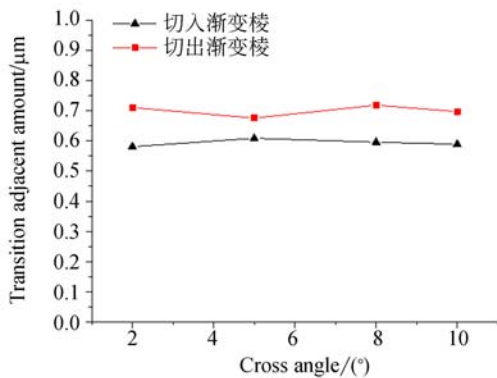


图 9 各交叉角度切入切出棱与转变邻接量的关系
Fig.9 Effect of cross angle on transition adjacent amount

由于超精密加工对于工件在加工中心的绝对位置坐标以及工件与刀具的相对位置坐标有着极为苛刻的精度要求,所以微沟槽模具的加工具有不可修复性。加工工艺中通过探刀环节所确定的工件表面相对坐标会存在一定的误差,该误差会反映到沟槽的加工深度上,实际的沟槽深度为探刀量与进刀深度之和,从而给沟槽切削邻接量的

选择带来困难。例如,在正常操作情况下探刀深度约为 $400 \sim 600 \text{ nm}$,此时若选择理想状态下的深度二倍沟槽间距,相邻沟槽间邻接量为 $800 \sim 1200 \text{ nm}$,根据试验预测所得磷化镍材料微沟槽脆塑转变邻接量,该加工条件下会产生缺陷脊棱,在目标微沟槽深度基础上将刀具进给深度减少 350 nm ,能够保证沟槽间相互邻接同时生成高质量脊棱。在实际加工中要根据目标的沟槽深度和探刀的实际情况规划具体加工方案,结合分步切削方法控制切削深度,在加工质量较优的邻接距离进行加工得到顶端高质量的微沟槽模具,如图 10 所示。

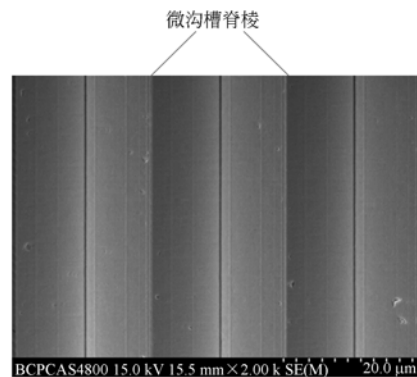


图 10 模具微沟槽 SEM 照片

Fig.10 SEM photograph of microgrooves on mold

4 模压成形技术

将切削加工得到的高质量微沟槽模具用于玻璃模压成形试验,试验在日本 SYS 公司模压成形机上进行。图 11 为模压成形流程示意图,首先将所制得 Ni-P 镀层模具送入成形机内部,精确控制温度,逐级升温;把玻璃预形体加热至软化温度以上,控制压力;在高温状态下加压,之后退火降温并保压,防止降温速率过快玻璃材料发生脆裂;最后将温度降至玻璃应变点以下完成脱模,得到微沟槽玻璃元件。在整个成形过程中,模压机内部通入氮气以防止内部元件的高温氧化^[6]。

图 12 为单点金刚石切削加工的微沟槽模具和模压得到的光学玻璃微沟槽元件。模具表面微沟槽并未全部覆盖,加工出部分邻接沟槽用于试验。成形过程中模压温度为 $550 \text{ }^\circ\text{C}$,玻璃的轴向变形量为 1 mm 。

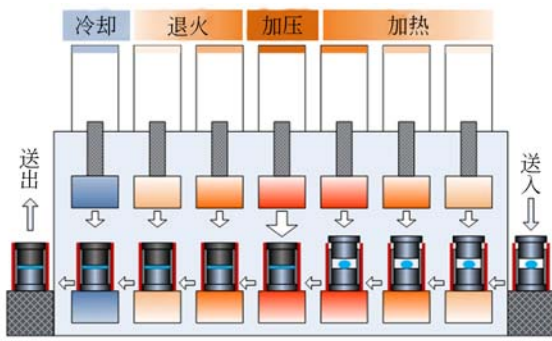


图 11 模压成形过程原理图

Fig. 11 Schematic diagram of glass molding process

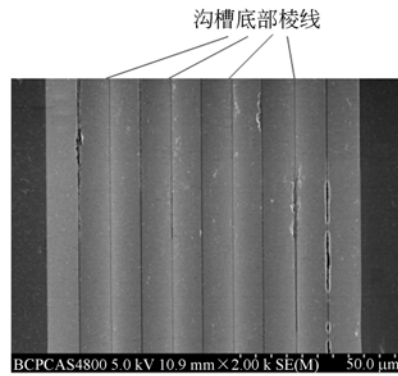
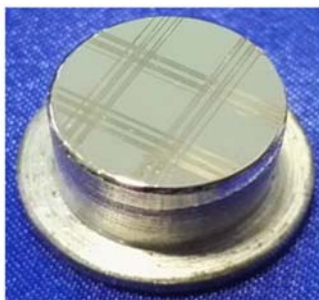


图 13 玻璃微沟槽 SEM 照片

Fig. 13 SEM photograph of microgrooves on optical glass



(a) 微沟槽模具

(a) Microgroove array mold



(b) 模压得光学微沟槽玻璃

(b) Molded optical glass

图 12 磷化镍模具与模压元件

Fig. 12 Photographs of Ni-P mold and molded glass

SEM 电镜扫描对成形微沟槽进行观察,结果如图 13 所示,玻璃元件沟槽底部棱线对应模具微沟槽脊棱,表面规整,使用奥林巴斯 OLS4100 共聚焦显微镜测量,得到玻璃的微沟槽轮廓,如图 14 所示。微沟槽底部的棱线都较为尖锐,获得了较优质的微沟槽光学元件。晶体 Ni-P 材料模具高温条件下的硬度和材料的加工特性保证了玻璃微沟槽的模压成形质量。

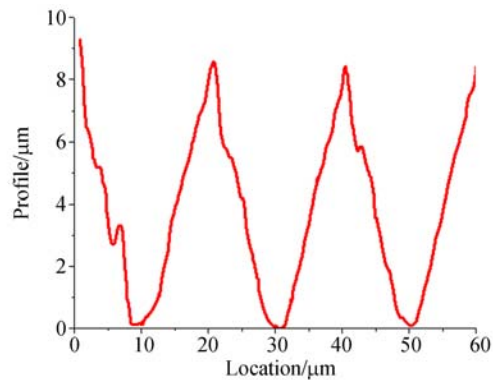


图 14 模压得到的玻璃表面微沟槽轮廓

Fig. 14 Profile of glass microgrooves after molding

5 结 论

本论文提出了一种小角度微沟槽交叉切削快速确定微沟槽邻接量范围的方法,建立了理论分析模型,实现了高磷晶态磷化镍模具的脆塑转变邻接量范围的快速精确测定,为磷化镍微沟槽模具的超精密加工工艺优化提供了理论依据。试验结果表明:在较小交叉角度下,微沟槽交叉切削形成渐变棱,随着材料去除厚度的增加,棱边处由高质量延性切削转变为脆性切削,形成加工缺陷。在刀具对切出棱材料静水压力和对切入棱切屑黏滞力的共同作用下,沟槽交叉切出所形成棱的加工质量总体优于切入棱;在材料去除截面形状相同的条件下,邻接沟槽脊棱的形貌精度位于切入棱和切出棱两者之间。当平行沟槽邻接量小于 570~720 nm 时,可避免在相邻两微沟槽的脊棱上产生微缺陷,实现高质量磷化镍模具的制造。

参考文献:

- [1] CHEN SH W, HSIEN J C, CHOU CH T, *et al.*. Experimental investigation and visualization on capillary and boiling limits of micro-grooves made by different processes[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 139(1-2): 78-87.
- [2] KIM I, MENTONE P F. Electroformed nickel stamp-er for light guide panel in LCD back light unit[J]. *Electrochimica Acta*, 2006, 52(4): 1805-1809.
- [3] HAVA S, AUSLENDER M. Design and analysis of low-reflection grating microstructures for a solar energy absorber[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000, 61(2): 143-151.
- [4] 尹韶辉, 靳松, 朱科军, 等. 非球面玻璃透镜模压成型的有限元应力分析[J]. *光电工程*, 2010, 37(10): 111-115.
YIN SH H, JIN S, ZHU K J, *et al.*. Stress analysis of compression molding of aspherical glass lenses using finite element method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(10): 111-115. (in Chinese)
- [5] YAN J W, OOWADA T, ZHOU T F, *et al.*. Precision machining of microstructures on electroless-plated NiP surface for molding glass components [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(10): 4802-4808.
- [6] 周天丰, 解加庆, 刘洋, 等. 光学玻璃微沟槽模压成形仿真与试验研究[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 446-453.
ZHOU T F, XIE J Q, LIU Y, *et al.*. Simulation and experimental study on the molding process for microgrooves on optical glass [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 446-453. (in Chinese)
- [7] ZHOU T F, LIANG ZH Q, WANG X B, *et al.*. Experiment on glass microgroove molding by using polycrystalline nickel phosphorus mold [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 797: 483-488.
- [8] ZHOU T F, YAN J W, LIANG ZH Q, *et al.*. Development of polycrystalline Ni-P mold by heat treatment for glass microgroove forming [J]. *Precision Engineering*, 2014, 39: 25-30.
- [9] YAN J W, OOWADA T, ZHOU T F, *et al.*. Precision machining of microstructures on electroless-plated NiP surface for molding glass components [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(10): 4802-4808.
- [10] FANG F Z, ZHANG G X. An experimental study of edge radius effect on cutting single crystal silicon [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003, 22(9-10): 703-707.
- [11] YAN J W, ASAMI T, HARADA H, *et al.*. Fundamental investigation of subsurface damage in single crystalline silicon caused by diamond machining [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(4): 378-386.
- [12] ARSENLIS A, PARKS D M, BECKER R, *et al.*. On the evolution of crystallographic dislocation density in non-homogeneously deforming crystals [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2004, 52(6): 1213-1246.
- [13] MADHAVAN V, CHANDRASEKAR S, FAR-RIS T N. Machining as a wedge indentation [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2000, 67(1): 128-139.

作者简介:



董晓彬(1990—),男,内蒙古包头人,博士研究生,2015年于南京理工大学获得硕士学位,主要从事超精密模具制造方面的研究。E-mail: phoenixdx@163.com

导师简介:



周天丰(1981—),男,湖北黄梅人,博士,教授,博士生导师,国家“青年千人”,2006年于清华大学获得硕士学位,2009年于日本东北大学获得博士学位,现为北京理工大学机械与车辆学院科研主任,主要从事光学器件模压成形工艺、超精密模具制造等方面的研究。E-mail: zhoutf@bit.edu.cn