

红外衍射光学模芯的超精密车削工艺与优化

隋博^{1,2}, 霍富荣^{1,2*}, 李闯^{1,2}, 杨超^{1,2}, 薛常喜^{1,2}¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;²长春理工大学先进光学设计与制造技术吉林省高校重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 为减小模芯的制造误差对模压成型的衍射光学元件(DOEs)光学性能的影响,对具有曲面基底衍射微结构表面的微晶铝合金模芯开展了单点金刚石车削(SPDT)工艺研究。基于遮挡效应和散射效应分析模芯制造误差对 DOEs 衍射效率的影响,建立刀具半径和刀具偏转角与衍射效率之间的数学关系模型,提出提高加工精度的优化方法。在该方法的指导下进行了衍射光学模芯车削实验,并对比预期衍射效率与实验结果。结果表明:采用该优化方法选择工艺参数能够减小模芯制造误差对衍射效率的影响,提高 DOEs 的光学性能,为 SPDT 衍射光学模芯制作提供参考。

关键词 测量; 衍射微结构; 金刚石车削; 模芯; 衍射效率; 工艺参数

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1312004

Ultra-Precision Turning Process and Optimization of Infrared Diffraction Optical Mold Insert

Sui Bo^{1,2}, Huo Furong^{1,2*}, Li Chuang^{1,2}, Yang Chao^{1,2}, Xue Changxi^{1,2}¹*School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;*²*Key Laboratory of Advanced Optical System Design and Manufacturing Technology of Universities of Jilin Province, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China*

Abstract To reduce the effect of manufacturing error of mold inserts on the optical performance of molding diffractive optical elements (DOEs), single point diamond turning process of microcrystalline aluminum alloy mold inserts with a curved substrate diffractive microstructure surface is studied. Based on the shadowing effect and scattering effect, the influence of mold insert manufacturing error on the diffraction efficiency of DOEs is analyzed, a mathematical relationship model among the tool radius, tool deflection angle, and diffraction efficiency is established, and an optimization method for improving machining accuracy is proposed. The turning experiment of diffractive optical mold inserts is carried out under the guidance of the method, and the expected diffraction efficiency is compared with the experimental results. The results show that using process parameters obtained by the proposed method can reduce the influence of mold insert manufacturing error on diffraction efficiency and improve the optical performance of DOEs, which provides a reference for SPDT diffractive optical mold insert manufacturing.

Key words measurement; diffractive microstructure; diamond turning; mold insert; diffractive efficiency; process parameters

1 引言

衍射光学元件(DOEs)具有特殊的光学特性和温度特性,在红外光学系统中具有重要应用价值,并广泛应用于红外探测和红外成像技术领域^[1-3]。利用单点金刚石车削(SPDT)技术,可在硅、锗、硫化锌、硒化锌

等常见的红外材料上加工衍射结构,但成本、制造工艺等因素限制了 DOEs 在红外光学系统的应用。硫系玻璃以其优良的红外特性,在红外光学系统中的使用愈加普遍,此外,硫系玻璃的模压成型转变温度低,可利用精密模压成型技术实现硫系玻璃 DOEs 的快速制造^[4-5],这满足红外 DOEs 的批量化生产需求。采用

收稿日期: 2021-11-18; 修回日期: 2021-12-22; 录用日期: 2022-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(61905024)、高等学校学科创新引智计划(D17017)

通信作者: *huofurong@cust.edu.cn

SPDT 可实现衍射光学模芯的高精度、高效率制造^[6-8], 但 DOEs 面型轮廓的非连续性, 使其金刚石车削加工目前仍面临挑战。衍射微结构的制造误差严重影响 DOEs 的光学性能, 因此探究衍射光学模芯的超精密车削工艺优化方法对于提升模芯的加工质量具有重要价值。Buralli 等^[9]通过分析衍射效率对衍射透镜调制传递函数的影响, 讨论了多色光积分衍射效率的计算方法; Yang 等^[10]分析了微结构高度误差和周期宽度误差对聚合物 DOEs 衍射效率的影响; Zhao 等^[11]分析了表面粗糙度误差对聚合物 DOEs 多色光积分衍射效率的影响。Zhou 等^[12]讨论了多层 DOEs SPDT 工艺中刀具圆弧半径与衍射效率的关系; 高翔等^[13]基于氟化钙材料的加工特性提出了 DOEs 的 SPDT 工艺优化方法。

为获得模芯的制造误差对成型 DOEs 光学性能的影响, 本文主要基于遮挡效应^[14-15]和散射效应^[16]分析衍射光学模芯的制造误差对衍射效率的影响。首先研究了衍射微结构在 SPDT 中制造误差的产生原因, 其次建立了衍射光学模芯的制造误差与衍射效率之间的数学关系模型, 通过分析模芯制造过程中刀具圆弧半径和刀具偏转角对成型 DOEs 的多色光积分衍射效率的影响, 提出了针对衍射光学模芯 SPDT 加工的工艺优化方法。最后通过模芯的 SPDT 加工实验, 验证了该工艺优化方法的有效性。

2 模芯制造误差与衍射效率的关系分析

模芯表面形貌特征会随着玻璃模压成型的过程复制到光学元件表面, 因此模压成型的 DOEs 的面型轮廓与模芯的面型轮廓互补, 模压成型光学元件的表面质量在很大程度上取决于模芯的车削表面形貌。同时, 由于刀具几何尺寸的影响, 衍射微结构的环带突变点处会产生未切削区域, 造成衍射微结构轮廓误差, 如图 1 所示。使用小半径的半圆弧刀具加工衍射微结构

表面可以获得较高的轮廓精度, 但其刀尖处的机械强度低, 在加工过程中易发生刀尖破裂。为了避免这种情况的发生, 对半圆弧刀具进行水平偏转安装可保证在车削过程中刀具与加工表面尽可能保持圆弧接触而非刀尖直接接触, 从而起到了保护刀具、延长刀具使用寿命和提升加工表面质量的作用, 但同时也使得衍射微结构的轮廓误差进一步增加。为了探究刀具偏转对微结构轮廓误差和表面质量的影响, 以衍射效率为评价指标, 针对微结构周期宽度误差、微结构高度误差和表面粗糙度与衍射效率之间的关系展开讨论。

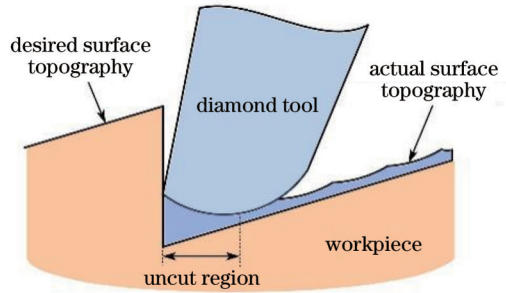


图 1 衍射微结构制造误差示意图
Fig. 1 Diagram of fabrication error of diffraction microstructure

图 2(a) 展示了水平偏转的半圆弧刀具在衍射环带突变点处的加工示意图, 其中 h_0 为设计结构高度, h_n 、 t_n 分别为衍射微结构高度误差和周期宽度误差, r_t 为刀具圆弧半径, f 为周期进给量, α 、 β 分别为衍射面突变点处面型轮廓的倾斜角和刀具偏转角。为细致地分析衍射微结构的周期宽度误差和高度误差的来源, 可由图 2(a) 中的几何关系得到衍射微结构的周期宽度误差 t_n 和高度误差 h_n 。图 2(b) 模拟了在 SPDT 中水平偏转的半圆弧刀具在衍射微结构表面上的残余刀痕分布, 刀具相对于微结构表面法线方向的偏转角为 $\alpha + \beta$, f' 为刀具在衍射微结构表面的平行方向上的周期进给量, 且 $f' = f / \cos \alpha$ 。

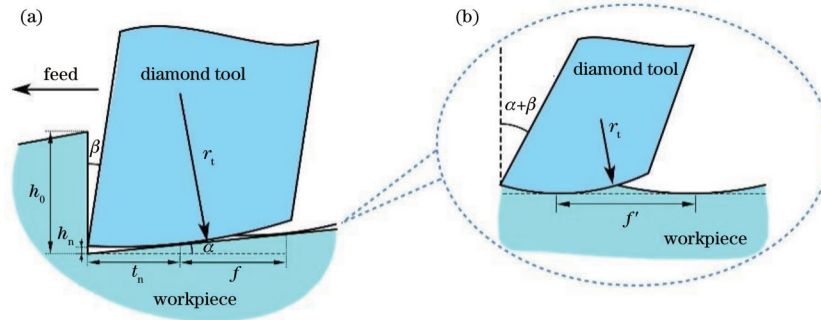


图 2 刀具偏转加工示意图。(a) 轮廓误差; (b) 刀痕分布
Fig. 2 Diagrams of tool deflection machining. (a) Profile error; (b) tool marks

周期宽度误差 t_n 和高度误差 h_n 可分别表示为

$$t_n = r_t (\sin \alpha + \sin \beta), \quad (1)$$

$$h_n = t_n \tan \alpha. \quad (2)$$

通过式(1)、(2)可知, 周期宽度误差和微结构高度误差与刀具圆弧半径、面型轮廓倾斜角和刀具偏转角

有关。根据标量衍射理论, 成像光学系统中的 DOEs 的微结构高度误差和周期宽度误差与衍射效率之间的数学关系为

$$\eta_m = \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{h_0 - h_n}{\lambda} [n(\lambda) - 1] \right\} \text{sinc}^2 \left(\frac{t_n}{T} \right), \quad (3)$$

式中： η_m 为遮挡效应的影响因子； λ 为入射光波长； T 为环带周期宽度； $n(\lambda)$ 为材料折射率函数； m 为衍射级次。

在 SPDT 过程中，刀具在工件表面由外向里沿螺旋线轨迹运动，从而实现刀具进给和材料去除。图 3 模拟了 SPDT 加工表面形貌。

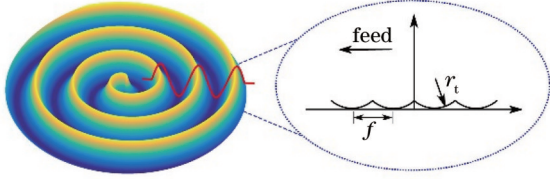


图 3 金刚石车削表面形貌

Fig. 3 Surface topography of SPDT turning process

理论表面粗糙度的峰谷 R_t 可表示为

$$R_t = r_t - \sqrt{r_t^2 - \frac{f^2}{4}} \quad (4)$$

金刚石刀具在工件表面产生的残余刀痕分布是其表面微观形貌的主要来源，也是影响表面粗糙度的重要因素。因此，半圆弧刀具在衍射微结构表面产生的残余刀痕分布可以看作周期为 f' 的周期函数，其在一个周期内的分布函数 $f_n(x)$ 为

$$f_n(x) = r_t - \sqrt{r_t^2 - x^2}, \quad -r_t \sin(\alpha + \beta) < x < f' - r_t \sin(\alpha + \beta) \quad (5)$$

通过残余刀痕分布 $f_n(x)$ 可计算理论表面粗糙度的算术平均值 R_a 和均方根值 R_q ：

$$R_a = \frac{1}{f'} \int_{-r_t \sin(\alpha + \beta)}^{f' - r_t \sin(\alpha + \beta)} f_n(x) dx, \quad (6)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{f'} \int_{-r_t \sin(\alpha + \beta)}^{f' - r_t \sin(\alpha + \beta)} [f_n(x) - R_a]^2 dx} \quad (7)$$

根据标量散射理论^[16]得到表面粗糙度与衍射效率之间的数学关系模型：

$$\Gamma = \cos^2 \left\{ \frac{2\pi [n_1(\lambda) \cos \theta_1 - n_0(\lambda) \cos \theta_2]}{\lambda} R_a \right\} \exp \left\{ - \left\{ \frac{2\pi [n_1(\lambda) \cos \theta_1 - n_0(\lambda) \cos \theta_2]}{\lambda} R_q \right\}^2 \right\}, \quad (8)$$

式中： Γ 为散射效应的影响因子； $n_0(\lambda)$ 、 $n_1(\lambda)$ 分别为空间介质折射率和材料折射率； θ_1 、 θ_2 分别为光线的入射角和出射角。

基于式(3)和式(8)，建立模芯制造误差与衍射效率 η 之间关系的综合分析模型：

$$\eta = \eta_m \Gamma = \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{h_0 - h_n}{\lambda} [n(\lambda) - 1] \right\} \text{sinc}^2 \left(\frac{t_n}{T} \right) \cdot \cos^2 \left\{ \frac{2\pi [n_1(\lambda) \cos \theta_1 - n_0(\lambda) \cos \theta_2]}{\lambda} R_a \right\} \exp \left\{ - \left\{ \frac{2\pi [n_1(\lambda) \cos \theta_1 - n_0(\lambda) \cos \theta_2]}{\lambda} R_q \right\}^2 \right\} \quad (9)$$

为评价 DOEs 在工作光谱范围内的光学性能，将多色光积分衍射效率 η_{int} 作为加工质量的评价依据：

$$\eta_{int} = \frac{1}{\lambda_{max} - \lambda_{min}} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \eta d\lambda = \frac{1}{\lambda_{max} - \lambda_{min}} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \eta_m \Gamma d\lambda, \quad (10)$$

式中： λ_{max} 和 λ_{min} 分别为工作光谱中波长的最大值和最小值。

3 仿真与分析

基于上述理论，利用数值仿真方法对衍射光学模芯的超精密车削过程展开分析。衍射光学模芯的三维面型轮廓如图 4 所示，衍射微结构的设计高度为 2.127 μm ，设计波长为 3.8 μm ，工作波段为 3~5 μm ，非球面基底的顶点曲率为 0.0012，圆锥系数为 0.0014。基底硫系玻璃材料采用 SCHOTT 公司的 IRG26，其折射率为 2.7956。

根据式(1)、(2)、(6)得到超精密车削参数与模芯制造误差之间的关系，随着刀具半径和刀具偏转角的变化，衍射微结构的周期宽度误差 t_n 、高度误差 h_n 和表面粗糙度 R_a 的变化分别如图 5(a)~(c)所示。随着刀

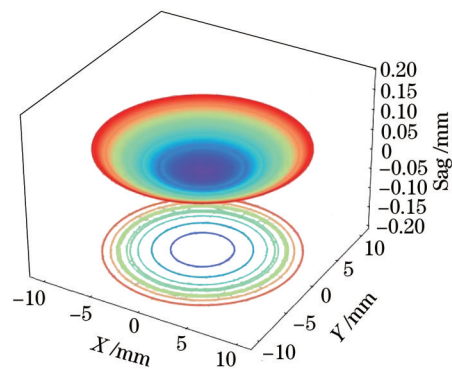


图 4 模芯的三维面型轮廓图

Fig. 4 Diagram of 3D surface profile of mold insert

具半径和刀具偏转角的增大，衍射微结构的周期宽度误差和高度误差均随之增大，而表面粗糙度随二者的增加而减小，且刀具半径对表面粗糙度的影响尤为显著。

根据式(10)得到模芯制造误差与多色光积分衍射效率之间的关系，随着刀具圆弧半径和刀具偏转角的

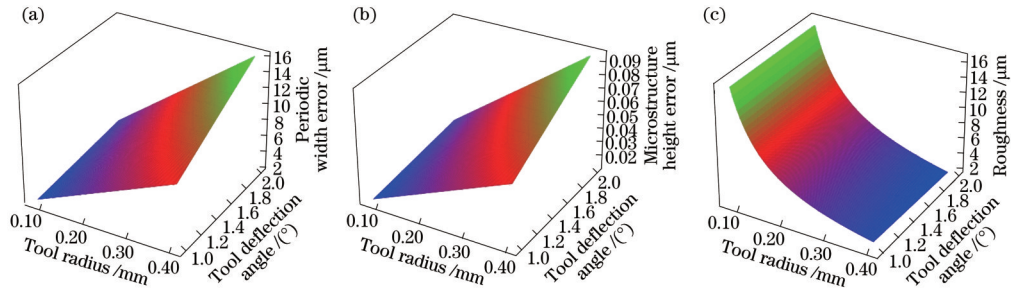


图 5 加工参数与制造误差的关系图。(a)周期宽度误差;(b)微结构高度误差;(c)表面粗糙度

Fig. 5 Diagrams of relationships between manufacturing error and process parameters. (a) Periodic width error; (b) microstructure height error; (c) roughness

变化,遮挡效应和散射效应引起的衍射效率变化如图 6(a)、(b)所示。随着刀具半径和刀具偏转角的增大,衍射微结构的轮廓误差随之增大,遮挡效应引起衍射效率的降低。随着刀具半径的增加,衍射效率对刀具偏转角度的变化愈发敏感,如图 6(a)所示。图 6(b)展示了随刀具半径和刀具偏转角的增大,由散射效应引

起的衍射效率损失减小。当刀具圆弧半径大于 0.25 mm 时,衍射效率随二者变化的趋势平缓。图 6(c)结合遮挡效应和散射效应对衍射效率的综合影响,模拟了衍射效率随刀具半径和刀具偏转角的变化。衍射效率随刀具半径的增大先升高后降低,衍射效率随刀具偏转角的增加而降低。

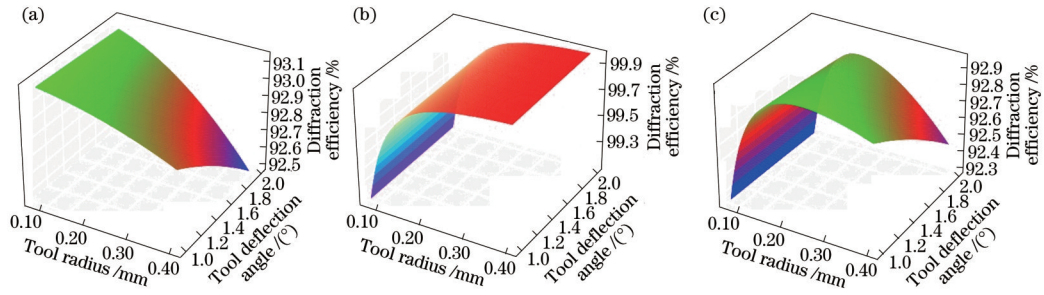


图 6 加工参数与衍射效率的关系图。(a)遮挡效应;(b)散射效应;(c)综合影响

Fig. 6 Diagrams of relationships between diffraction efficiency and process parameters. (a) Shadowing effect; (b) scattering effect; (c) comprehensive effect

为进一步探究曲面基底衍射面的工艺参数,图 7 给出了刀具半径为 0.25 mm,衍射面突变点处面型斜率分别为 0.0059, 0.0083, 0.0102, 0.0145 时衍射效率与刀具偏转角之间的关系。衍射效率随刀具偏转角的增大而降低;且随面型斜率的增大,衍射效率对刀具偏转角的变化愈加敏感。

为探究在预期衍射效率下面型斜率与刀具偏转角

之间的关系,利用多项式拟合得到拟合系数,并由此得到最大偏转角与衍射微结构面型斜率和预期衍射效率之间的关系:

$$\beta_{\max} = 4.889 \times 10^4 \alpha - (527.32\alpha + 96.32)\eta_p + 8945, \quad (11)$$

式中: η_p 为预期衍射效率; β_{\max} 为最大刀具偏转角。

当预期衍射效率 η_p 和衍射面突变点处的面型斜率确定,则刀具偏转角小于 β_{\max} 时多色光积分衍射效率不低于预期衍射效率。当设定预期衍射效率为 92.852%、92.85% 和 92.848%, 衍射面突变点处的面型倾斜角为 0.0059 rad 时,由式(11)得到最大刀具偏转角为 1.066°, 1.265° 和 1.464°。利用式(11)可为衍射光学模芯的金刚石车削实验提供参考。

4 模芯的车削实验

4.1 实验设计

采用 Precitech Nanoform 700 单点金刚石机床作为加工设备、RSA905 微晶铝合金作为模芯材料,并采用 Contour 公司的 0.25 mm 半圆弧刀具,设计了衍射光学模芯的 SPDT 实验,模芯的面型轮廓如图 4 所示。

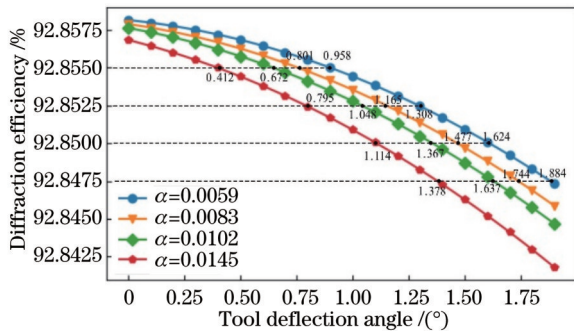


图 7 不同面型斜率下衍射效率与刀具偏转角的关系

Fig. 7 Relationship between diffraction efficiency and tool deflection angle under different slope

利用轮廓仪的检测数据补偿基底面型轮廓,从而在模芯表面加工出高精度的非球面基底,然后将衍射微结构叠加在非球面基底上,通过控制机床的 B 轴

旋转实现刀具偏转角度从 $1.2^{\circ} \sim 1.8^{\circ}$ 的精确控制。实验过程如图 8 所示,模芯车削实验的工艺参数在表 1 中给出。

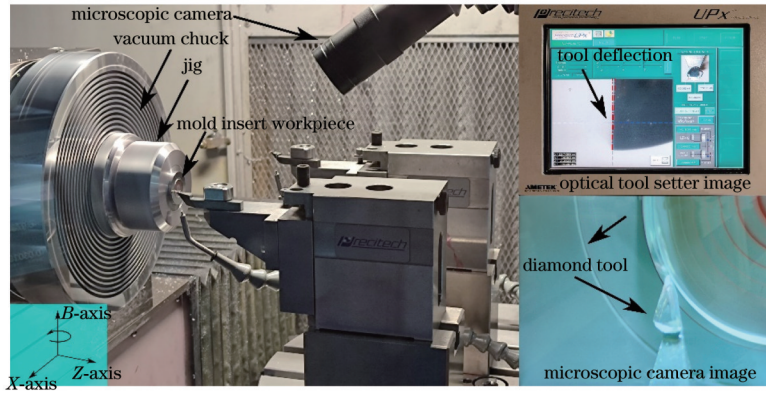


图 8 实验过程示意图

Fig. 8 Diagram of experimental process

表 1 金刚石车削工艺参数
Table 1 Process parameters of SPDT

Parameter	Value
Feed rate / (mm · min ⁻¹)	2
Spindle speed / (r · min ⁻¹)	2000
Depth of cut / μm	2
Tool radius / mm	0.25
Tool deflection angle / (°)	1.2-1.8

其轮廓误差峰谷(PV)值为 $0.199 \mu\text{m}$,符合衍射面基底的预期精度要求。

采用白光干涉仪对实验样件的表面粗糙度和衍射微结构轮廓进行检测。图 10 给出了面型轮廓倾斜角为 0.0059 rad 、刀具偏转角度为 1.2° 时的加工结果,其中图 10(b)为表面粗糙度的测量结果,其表面粗糙度 $R_a=3.059 \text{ nm}$ 。图 10(c)为衍射微结构面型轮廓的测量结果,通过数据游标可以获得衍射微结构的实际特征尺寸,其衍射微结构高度为 $2.009 \mu\text{m}$,遮挡区域宽度为 $7.597 \mu\text{m}$ 。

4.2 结果与分析

图 9 给出了非球面基底面型的轮廓仪检测结果,

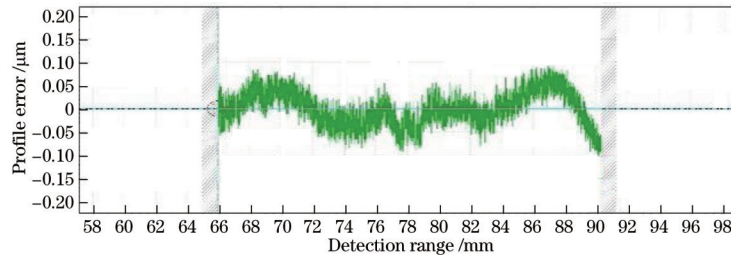


图 9 基底面型轮廓误差

Fig. 9 Error of substrate profile

统计并分析了各组实验的检测结果,如表 2 所示。利用最小二乘法拟合检测结果,并绘制了拟合曲线图,如图 11 所示。

由式(1)、(2)可知,随着刀具偏转角度的增加,刀具尺寸对衍射微结构特征的影响愈发显著,环带处的阴影区域随之扩大,衍射微结构的周期宽度误差和高度误差增加,表面粗糙度随之降低。图 11 给出的实验结果与衍射微结构制造误差的理论计算模型的变化趋势相同,验证了该计算模型的有效性。根据实验结果的拟合数据计算并绘制了不同周期宽度 T 下积分衍射效率随刀具偏转角度的变化曲线,如图 12 所示。

由图 12 可知,在各个周期宽度下,当刀具偏转角

度为 1.066° 、 1.265° 和 1.464° 时,积分衍射效率接近 92.457% 、 92.102% 和 91.699% ,而由式(11)得到的预期衍射效率为 92.852% 、 92.850% 和 92.848% ,模型预测误差分别为 0.425% 、 0.806% 和 1.237% ,在误差允许范围内,这可以证明工艺参数优化方法的有效性。

5 结 论

基于遮挡效应和散射效应分析了衍射光学模芯的超精密车削过程中刀具半径和刀具偏转角对模压成型的 DOEs 积分衍射效率的影响,并以此优化了 SPDT 工艺参数。以预期衍射效率和面型斜率作为限定条

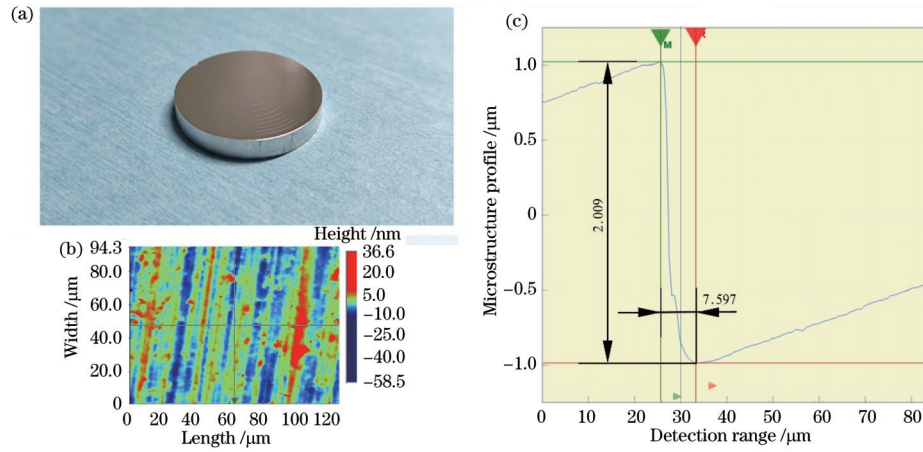


图 10 加工结果。(a)模芯;(b)表面粗糙度;(c)微结构轮廓

Fig. 10 Process results. (a) Mold insert; (b) surface roughness; (c) microstructure profile

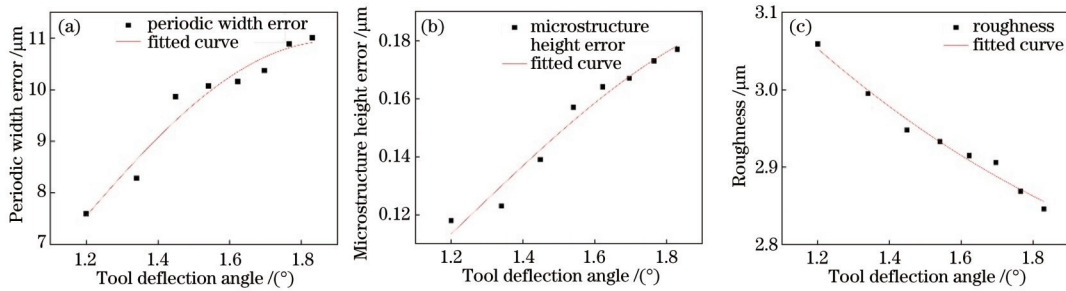


图 11 实验结果。(a)周期宽度误差;(b)微结构高度误差;(c)表面粗糙度

Fig. 11 Experimental results. (a) Periodic width error; (b) microstructure height error; (c) surface roughness

表 2 检测数据

Table 2 Measurement data

Deflection angle / (°)	Periodic width error / μm	Microstructure height error / μm	Roughness / nm
1.20	7.597	0.118	3.059
1.34	8.285	0.123	2.995
1.44	9.867	0.139	2.948
1.54	10.069	0.157	2.933
1.62	10.157	0.164	2.915
1.69	10.371	0.167	2.906
1.76	10.888	0.173	2.869

件,得到最大的刀具偏转角,进而保证了DOEs的衍射效率不低于预期衍射效率。通过衍射光学模芯的SPDT实验,探究了不同刀具偏转角对衍射微结构的制造误差的影响,所得结果验证了衍射光学模芯SPDT制造误差计算模型的有效性。利用工艺优化模型得到了预期衍射效率为92.852%、92.850%和92.848%时的最大刀具偏转角分别为1.066°、1.265°和1.464°,在模芯的车削实验中得到的衍射效率分别为92.457%、92.102%和91.699%,则模型预测误差分别为0.425%、0.806%和1.237%,在误差允许范围内,这验证了衍射效率计算模型和工艺参数优化方法的可靠性。该工艺优化方法对高精度衍射光学模芯的

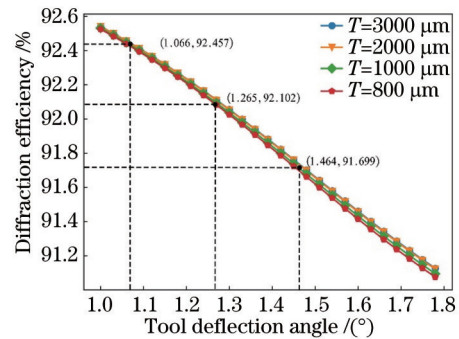


图 12 不同周期宽度下衍射效率与刀具偏转角的关系

Fig. 12 Relationship between diffraction efficiency and tool deflection angle under different period widths

超精密制造具有重要的指导意义,拓宽了模压成型DOEs在红外光学领域的应用。

参 考 文 献

[1] 付强, 张新. 中波/长波双色红外光学系统材料选择[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0208003.
Fu Q, Zhang X. Materials choose for mid-wave/long-wave dual-waveband infrared optics[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0208003.
[2] 杨亮亮, 刘成林, 沈法华, 等. 工作在一定入射角度范围内镀有增透膜的衍射光学元件的衍射效率研究[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1205002.

- Yang L L, Liu C L, Shen F H, et al. Diffraction efficiency of diffractive optical elements with antireflection coatings within a certain incident angle range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1205002.
- [3] Kuschmierz R, Scharf E, Ortegón-González D F, et al. Ultra-thin 3D lensless fiber endoscopy using diffractive optical elements and deep neural networks[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(4): 30.
- [4] He P, Wang F, Li L K, et al. Development of a low cost high precision fabrication process for glass hybrid aspherical diffractive lenses[J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(8): 085703.
- [5] 舒成松, 董浩, 尹韶辉, 等. 高精度微结构玻璃光学元件阵列模压技术研究进展[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 1967-1985.
- Shu C S, Dong H, Yin S H, et al. Research progress of high precision micro structure glass optical element array molding technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 1967-1985.
- [6] Zhu L, Zhang Y L, Sun H B. Miniaturising artificial compound eyes based on advanced micronanofabrication techniques[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(1): 84.
- [7] Zhang Y Y, Liang R G, Spires O J, et al. Precision glass molding of diffractive optical elements with high surface quality[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(23): 6438-6441.
- [8] 刘兴国, 霍富荣, 薛常喜. 衍射微透镜注塑成型工艺参数优化及误差补偿[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 052204.
- Liu X G, Huo F R, Xue C X. Parameter optimization and error compensation of diffraction microlens injection molding process[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 052204.
- [9] Buralli D A, Morris G M. Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(22): 4389-4396.
- [10] Yang L L, Cui Q F, Liu T, et al. Effects of manufacturing errors on diffraction efficiency for multilayer diffractive optical elements[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(32): 6128-6133.
- [11] Zhao L D, Cui Q F, Mao S, et al. Effect of the surface roughness on the efficiency of diffractive optical elements[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(35): 10276-10283.
- [12] Zhou P, Xue C X, Yang C, et al. Diffraction efficiency evaluation for diamond turning of harmonic diffractive optical elements[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(6): 1537-1544.
- [13] 高翔, 李闯, 坎金艳, 等. CaF₂衍射光学元件的金刚石车削工艺优化[J]. *光学学报*, 2021, 41(22): 2205001.
- Gao X, Li C, Kan J Y, et al. Optimization of diamond turning process for CaF₂ diffractive optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(22): 2205001.
- [14] Yang H F, Xue C X. Diffraction efficiency evaluation for diamond turning of multilayer diffractive optical elements[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(7): 075101.
- [15] 毛珊, 解娜, 赵建林. 斜入射下双波段双层衍射光学元件优化设计与分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1605001.
- Mao S, Xie N, Zhao J L. Optimal design and analysis of dual-band double-layer diffractive optical element under oblique incidence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1605001.
- [16] Harvey J E, Schroeder S, Choi N, et al. Total integrated scatter from surfaces with arbitrary roughness, correlation widths, and incident angles[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 013402.