

衍射微透镜注塑成型工艺参数优化及误差补偿

刘兴国, 霍富荣, 薛常喜*

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了制造高精度塑料衍射微透镜, 提出采用 Taguchi 方法在大范围内选择工艺参数, 通过信噪比确定显著影响微结构成型精度的工艺参数, 并通过加权综合评分法进行多目标优化获得最优参数组合。结果表明保压压力、模具温度和保压时间对微结构成型精度具有显著影响。为了提高衍射微结构成型精度, 分析了衍射微透镜注塑成型误差的主要来源并建立了误差补偿模型。实验结果表明注塑成型的衍射微结构高度误差为 5.69%, 周期宽度误差为 6.16%, 衍射微结构的注塑成型精度获得显著提高。

关键词 光学设计; 衍射微结构; 注塑成型; 正交实验; 多目标优化; 误差补偿

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.052204

Parameter Optimization and Error Compensation of Diffraction Microlens Injection Molding Process

Liu Xingguo, Huo Furong, Xue Changxi*

School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to manufacture high-precision plastic diffraction microlenses, this paper proposes to select the process parameters in a wide range by Taguchi method, determine the process parameters that significantly affect the molding precision of microstructure through the signal-to-noise ratio, and obtain the optimal parameter combination through multi-objective optimization by weighted comprehensive scoring method. The results show that the holding pressure, mold temperature, and holding time have a significant impact on the microstructure molding precision. In order to improve the precision of diffraction microstructure, the main source of diffraction microlens injection molding error is analyzed and the error compensation model is established. The experimental results show that the diffraction microstructure of the injection molding has a height error of 5.69% and a period error of 6.16%, and the injection molding precision of the diffraction microstructure is significantly improved.

Key words optical design; diffraction microstructure; injection molding; orthogonal experiment; multi-objective optimization; error compensation

OCIS codes 220.4000; 220.4610; 220.1920; 220.1250

1 引言

衍射微透镜可以使光学系统具有体积小、元件数量少、重量轻等优势, 这些独特的优势使衍射微透镜具有重大应用价值^[1-3]。目前, 衍射微透镜的主要加工方法有光刻和单点金刚石车床直接加工, 但是光刻只能加工平面基底, 直接加工又会面临加工成本高、效率低的问题。注塑成型技术具有经济效益

好、效率高、产品设计复杂实用等优点, 被广泛用在医疗^[4]和移动通信^[5]等众多领域。通过注塑成型技术实现高精度塑料衍射微透镜的快速制造是非常有必要的。Carvalho 等^[6]研究表明利用注塑成型复制具有连续微结构和特征尺寸为微米和亚微米级别的光学元件是可行的。Holthusen 等^[7]通过快刀伺服金刚石车削工艺加工衍射微结构并进行注塑成型研究, 研究发现材料对微结构的复制度有显著影响, 在

收稿日期: 2019-11-27; 修回日期: 2019-12-16; 录用日期: 2019-12-24

基金项目: 吉林省重点科技研发项目(20180201030GX)

* E-mail: xcx272479@sina.com

三种材料中聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料可获得最佳复制度,但成型误差仍然较大。Lee等^[8]研究了成型条件对微透镜阵列复制度的影响,结果表明微结构复制度高度依赖于成型参数。衍射微透镜的成型精度比普通的非球面透镜更加难以控制,这是因为塑料填充衍射微结构时会有更复杂的流动和填充过程^[9-10]。有学者对不同尺寸的衍射微结构进行注塑成型研究,结果显示注塑成型衍射微透镜的微结构高度与周期宽度存在10%或更大的误差^[11-12],这些误差严重影响衍射微透镜的衍射效率及应用^[13]。

由于塑料衍射微透镜的成型精度受众多因素影响,其工艺方案的研发成本高且耗时长,数据显示研究人员的工作多集中在成型过程中的参数优化部分^[14-15],因此有必要对注塑工艺及成型缺陷进行更深入的研究。为了利用注塑成型制造高精度的塑料衍射微透镜,本文分析了不同的影响因素对衍射微透镜成型质量的影响,通过一种多目标优化方法获得最佳工艺参数组合。研究了微结构成型误差的主要来源,建立误差补偿模型并提高微结构成型精度。

2 衍射微结构设计和优化方法

2.1 衍射微结构设计

衍射微透镜由于其特殊色散性质、平像场性质、温度稳定性质及任意相位性质在可见光和红外光学系统中得到广泛应用,一般衍射微透镜的微结构高度为几微米到几十微米。设计了一个微结构高度为 $1.08\ \mu\text{m}$ 的衍射面用于注塑成型实验。利用商业软件Moldflow获得衍射微透镜的模拟结果,由于软件无法有效分析过小的微结构填充和变形情况,而实际生产中塑件的收缩变形是在径向和轴向按比例进行的,所以把微结构高度按一定比例放大后进行仿真,计算得到实际高度的收缩量。衍射微透镜的外径为38 mm,中心厚度为4 mm。透镜的一侧是平面,另一侧是衍射面,衍射面型如图1和图2所示。选用的注塑材料为具有高透明度和高阿贝数特性的PMMA。

2.2 优化方法

该实验通过两个步骤提高微结构的成型精度。第一步,确定需要考虑的工艺参数,并在Taguchi法下利用Moldflow商业软件进行模拟并获得衍射微结构的变形结果。再利用方差分析(ANOVA)确定各工艺参数对微结构成型质量的影响,最后通过加权综合评分法对微结构注塑成型进行多目标优化,

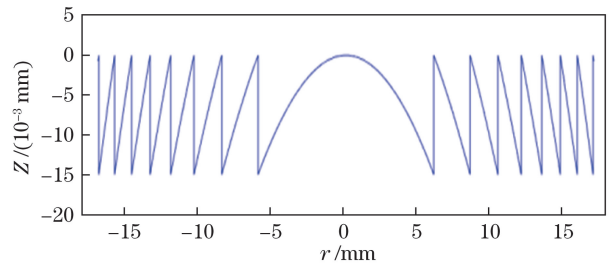


图1 放大后衍射面

Fig. 1 Diffraction surface after magnification

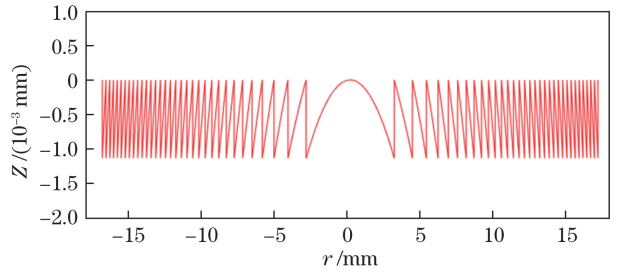


图2 设计衍射面

Fig. 2 Designed diffraction surface

获得最优参数组合。第二步,分析衍射微结构成型误差的主要来源和原因,提出误差补偿模型并进行实验验证,最终实现高精度塑料衍射微透镜的制造。

3 优化过程和结果讨论

3.1 优化过程

在第一阶段,基于材料特性确定实验中需要考虑的工艺参数和参数水平。为了深入分析工艺参数和参数水平对衍射微结构注塑成型的影响,通过单因素实验筛选各工艺参数后确定需要考虑的六个控制因素和三个因素水平,如表1所示。

表1 正交实验的控制因素和因素水平

Table 1 Control factors and factor levels of Taguchi experiment

Factor	Symbol	Level 1	Level 2	Level 3
Melt temperature	A / $^{\circ}\text{C}$	230	240	250
Mold temperature	B / $^{\circ}\text{C}$	65	75	85
Injection time	C /s	2	4	6
Cooling time	D /s	40	60	80
Holding pressure	E /MPa	120	135	150
Holding time	F /s	15	25	35

在仿真分析阶段进行 $L_{27}(3^8)$ 的正交实验,将表1中各工艺参数及参数水平分配至正交表2中,表中的变量 ΔH 和 ΔT 为正交实验的响应目标,分别为衍射微透镜的微结构高度误差和周期宽度误差,利用Moldflow软件仿真获得微透镜的轴向变形和径向变形。质量工程中,利用信噪比控制参数

计算最小方差,获得具有显著影响的参数。如表 2 所示,分别计算了两个响应目标在 27 组实验中的信噪比 f_{i1} 和 f_{i2} 。信噪比的计算公式为

$$f_{ij} = -10\lg\left(\sum_{i=1}^n y_i^2/n\right), \quad (1)$$

式中: f_{ij} 为响应目标的信噪比; y_i 为两个响应目标值; n 为实验重复次数。

由于方差分析不能对多个响应目标进行参数优化,所以有必要建立一种多目标优化工艺参数的方法。通过加权综合评分法将多目标问题转化为单一目标,实现对多目标的工艺参数优化。加权综合评分值计算公式为

$$F_i = \sum_{j=1}^m \rho_j f_{ij}, \quad (2)$$

表 2 $L_{27}(3^6)$ 正交实验数据和信噪比

Table 2 Orthogonal test data and signal-to-noise ratio for $L_{27}(3^6)$

Run	A / $^{\circ}\text{C}$	B / $^{\circ}\text{C}$	C /s	D /s	E /MPa	F /s	ΔH / μm	f_{i1}	ΔT / μm	f_{i2}	F_i
1	230	65	2	40	120	15	6.1	-15.7066	59.1	-35.4317	-1.8954
2	230	65	2	40	135	25	5.5	-14.8073	53.1	-34.5019	-1.8198
3	230	65	2	40	150	35	7.9	-17.9525	86.5	-38.7403	-2.1137
4	230	75	4	60	120	15	6.0	-15.5630	62.3	-35.8898	-1.9015
5	230	75	4	60	135	25	4.3	-12.6694	38.7	-31.7542	-1.6241
6	230	75	4	60	150	35	7.3	-17.2665	79.0	-37.9525	-2.0537
7	230	85	6	80	120	15	6.8	-16.6502	80.1	-38.0727	-2.0246
8	230	85	6	80	135	25	3.8	-11.5957	20.2	-26.1070	-1.3978
9	230	85	6	80	150	35	4.0	-12.0412	24.0	-27.6042	-1.4663
10	240	65	4	80	120	25	7.9	-17.9525	86.8	-38.7704	-2.1946
11	240	65	4	80	135	35	3.8	-18.8897	89.8	-39.0655	-2.1731
12	240	65	4	80	150	15	3.4	-10.6296	32.6	-30.2644	-1.4713
13	240	75	6	40	120	25	5.6	-14.9638	49.0	-33.8039	-1.8072
14	240	75	6	40	135	35	6.8	-16.6502	71.5	-37.0861	-1.9950
15	240	75	6	40	150	15	6.3	-15.9868	62.1	-35.8618	-1.9232
16	240	85	2	60	120	25	5.5	-14.8073	52.5	-34.4032	-1.8169
17	240	85	2	60	135	35	3.3	-10.3703	16.3	-24.9103	-1.2969
18	240	85	2	60	150	15	7.3	-17.5012	84.2	-38.5062	-2.0828
19	250	65	6	60	120	35	9.7	-19.7354	104.4	-40.3740	-1.9972
20	250	65	6	60	135	15	5.3	-14.4855	53.2	-34.5182	-1.8033
21	250	65	6	60	150	25	4.9	-13.8039	46.6	-33.3677	-1.7326
22	250	75	2	80	120	35	8.4	-18.4856	92.3	-39.3040	-2.1589
23	250	75	2	80	135	15	6.4	-16.1236	75.3	-37.5359	-1.9806
24	250	75	2	80	150	25	4.3	-12.6694	15.3	-23.6938	-1.3823
25	250	85	4	40	120	35	4.0	-12.0412	25.0	-27.9588	-1.4770
26	250	85	4	40	135	15	8.3	-18.3816	88.2	-38.9094	-2.1415
27	250	85	4	40	150	25	4.5	-13.0643	31.6	-29.9937	-1.5922

3.2 结果和讨论

方差分析通常用于识别控制因素的影响。表 3 和表 4 是利用 Minitab 软件对微结构高度误差和周期宽度误差的信噪比进行计算得到的 ANOVA 表,

式中: ρ_j 为权因子系数。由于两个响应目标由衍射微透镜的径向和轴向变形结果获得,且具有相同的数量级,因此不需要再进行量纲的统一。权因子系数计算公式为

$$\rho_j = \frac{\epsilon_j}{f_{ij\max} - f_{ij\min}}, \quad (3)$$

式中: ϵ_j 为 f_{ij} 对成型质量的影响系数; $f_{ij\max}$ 、 $f_{ij\min}$ 为响应目标信噪比的最大、最小值。对于衍射微透镜来说,微结构高度误差和周期宽度误差对微结构成型精度和衍射效率都有重要影响,单层衍射微透镜的周期宽度误差与微结构高度误差对衍射效率变化的影响趋势基本一致^[16],使影响系数 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.5$ 。最后由(2)式计算得到的加权综合评分值如表 2 中 F_i 所示。

其中 G、S、M、L 和 P 分别表示各参数的自由度、离差平方和、均方、检验统计值和伴随概率,表中显著影响因素为保压时间、模具温度和保压压力。由微结构高度误差和周期宽度误差的信噪比特性获得

表3 高度误差信噪比的方差分析

Table 3 ANOVA of signal-to-noise ratio for height error

Factor	G	S	M	L	P
A	2	1.07	0.54	0.13	0.88
B	2	7.98	3.99	1.00	0.39
C	2	0.18	0.09	0.02	0.98
D	2	0.11	0.05	0.01	0.99
E	2	5.93	2.96	0.74	0.49
F	2	11.34	5.67	1.42	0.28
Residuals	14	55.96	3.99		
Total	26	82.55			

表4 周期误差信噪比的方差分析

Table 4 ANOVA of signal-to-noise ratio for period error

Factor	G	S	M	L	P
A	2	101.80	50.90	0.06	0.94
B	2	2065.30	1032.65	1.23	0.32
C	2	39.90	19.94	0.02	0.98
D	2	24.10	12.04	0.01	0.99
E	2	1311.80	655.90	0.78	0.48
F	2	2941.70	1470.83	1.75	0.21
Residuals	14	11775.70	841.12		
Total	26	18260.30			

图3和图4的主效应图。从图中可以看到两种误差对应的最佳参数组合分别为 $A_1B_3C_3D_3E_3F_2$ 和 $A_3B_3C_1D_3E_3F_2$, 两个参数组合的仿真结果中最大高度误差和总周期宽度误差分别为 $3\ \mu\text{m}$ 、 $17.4\ \mu\text{m}$ 和 $3.4\ \mu\text{m}$ 、 $14.7\ \mu\text{m}$ 。从表3和表4可以看到, 虽然两个优化目标的显著影响因素相同, 但对其他几个工艺参数也有明显不同的表征, 所以进行多目标优化是非常必要的。

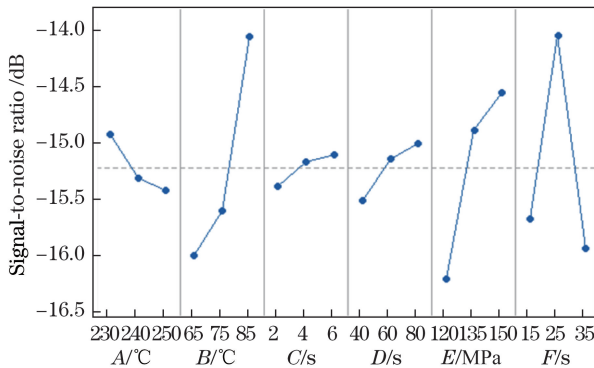


图3 高度误差信噪比主效应图

Fig. 3 Main effect plot of signal-to-noise ratio for height error

均值分析(ANOM)通常用于质量控制, 将每组的平均值与整个过程的平均值进行比较, 以检测统计上显著的差异。通过均值分析方法分析多目标优化后的加权综合评分值得到表5所示的均值响应

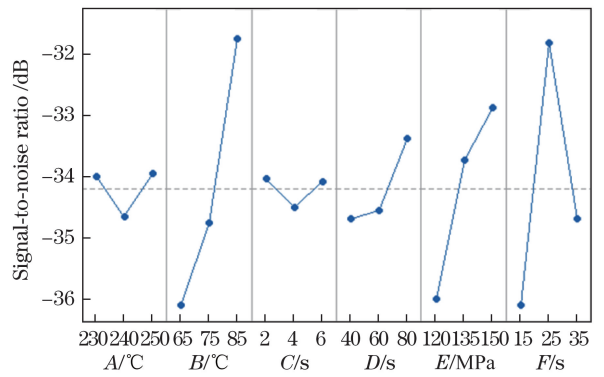


图4 周期误差信噪比主效应图

Fig. 4 Main effect plot of signal-to-noise ratio for period error

表, 可以看到控制参数的显著性由高到低依次为 F, B, E, A, C, D 。加权评分值的均值主效应如图5所示, 可以清楚地看到较高的模具温度有助于减小微结构误差, 这是因为高模具温度有助于熔体在型腔中的流动和对微结构的填充。增大保压压力可以在保压过程中提高型腔内熔体的密度, 有效减小塑件的冷却收缩变形从而提高成型质量。保压时间在25 s时为最佳值, 与15 s和35 s时的结果有很大差距。分析原因是较宽因素水平可能导致实验中出现了保压不足和过保压现象。最终优化的参数组合为 A_3 (熔融温度: $250\ \text{°C}$), B_3 (模具温度: $85\ \text{°C}$), C_3 (注塑时间: 6 s), D_3 (冷却时间: 80 s), E_3 (填充压力: 150 MPa), F_2 (保压时间: 25 s)。最佳参数组合的仿真结果如图6所示, 总周期误差为 $10.2\ \mu\text{m}$, 最大高度误差为 $2.8\ \mu\text{m}$, 优化结果明显优于表2中的数据。

表5 加权评分价值均值响应

Table 5 Mean value response of weighted evaluation values

Level	Mean value response					
	A	B	C	D	E	F
1	-1.811	-1.911	-1.862	-1.863	-1.919	-1.914
2	-1.886	-1.870	-1.848	-1.836	-1.827	-1.708
3	-1.807	-1.723	-1.794	-1.806	-1.758	-1.883
Delta	0.079	0.188	0.068	0.057	0.162	0.206
Serial	4.000	2.000	5.000	6.000	3.000	1.000

4 微结构误差补偿

衍射效率对于衍射微透镜的实际应用至关重要, 一般要求中心波长处实测的衍射效率高于95%。由于微结构高度误差、周期宽度误差、表面粗糙度及衍射微结构的侧面倾斜等都会降低衍射效率, 所以一般要求单层衍射微透镜的微结构高度和

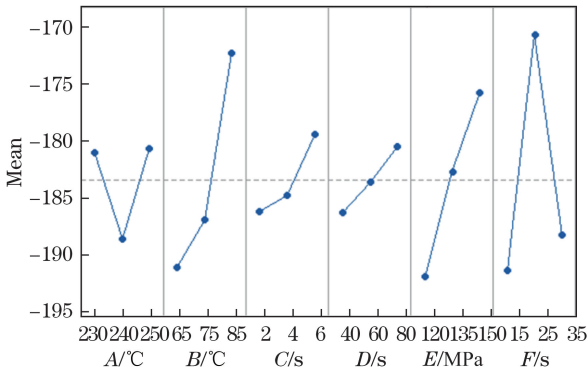


图5 加权评分值均值主效应

Fig. 5 Main effect plot of mean of weighted evaluation values

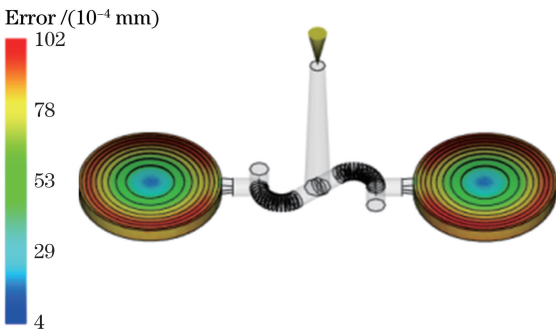


图6 Moldflow 仿真结果图

Fig. 6 Simulation result by Moldflow

周期宽度误差小于7%，由误差造成衍射效率的下降小于2%。成型误差的存在严重影响衍射效率的提高，研究中发现微结构成型误差的主要来源有两个，一是型芯加工误差和模具结构，二是塑料注塑成型后的固有收缩。因此提出了一种对收缩误差和型芯加工误差的补偿模型，对衍射微透镜的误差进行补偿并通过注塑实验进行验证。

4.1 误差补偿模型

塑料衍射微透镜的成型误差主要由注塑收缩

误差和型芯加工误差组成。收缩误差 $[\{\Delta h_1(r) | r=0,1,\dots,n\}]$ 是指注塑成型的衍射微透镜的衍射面与设计衍射面 $[\{h(r) | r=0,1,\dots,n\}]$ 之间的微结构高度误差 (ΔH_1) 和周期宽度误差 (ΔT_1) 。微结构高度误差分析结果如图7所示，周期宽度误差分析结果如图8所示。型芯加工误差 $[\{\Delta h_2(r) | r=0,1,\dots,n\}]$ 是指模具型芯加工过程中因为刀具对微结构的干涉导致型芯衍射面与设计衍射面之间的微结构高度误差 (ΔH_2) 和周期宽度误差 (ΔT_2) ，如图9所示。

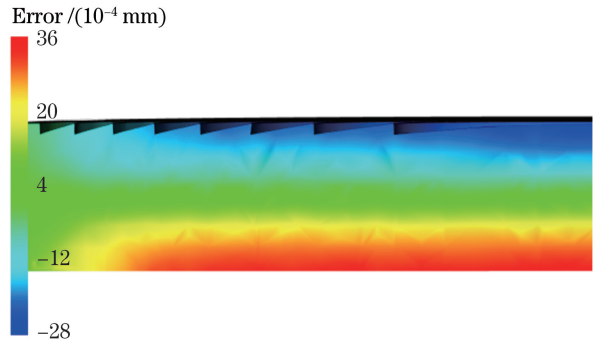


图7 高度误差仿真结果

Fig. 7 Height error simulation results

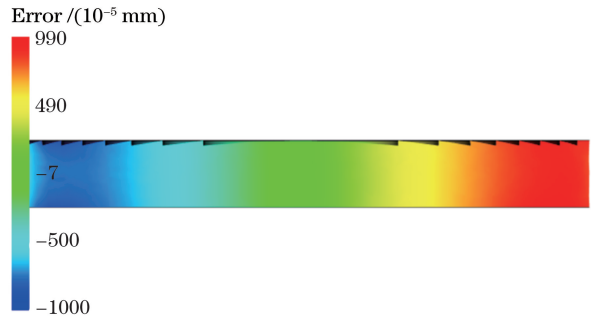


图8 周期宽度误差仿真结果

Fig. 8 Period error simulation results

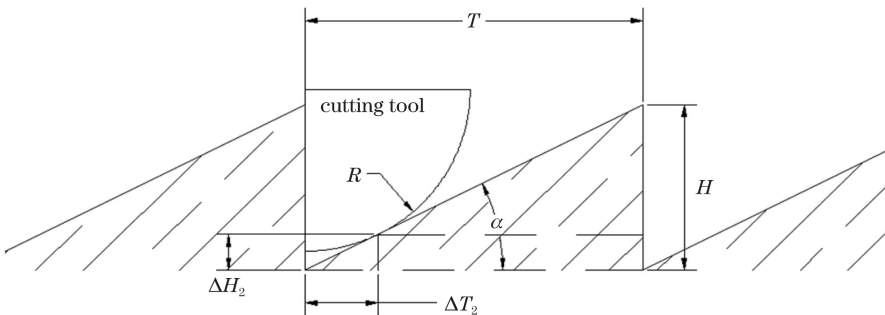


图9 模芯加工误差

Fig. 9 Mold core machining error

补偿注塑收缩误差和型芯加工误差加到设计的衍射面型中即可得到补偿后的新衍射面型

$[\{Z(r) | r=0,1,\dots,n\}]$ 。由于 ΔT_1 沿径向均匀变化，如图10所示，所以根据径向周期个数可以得到

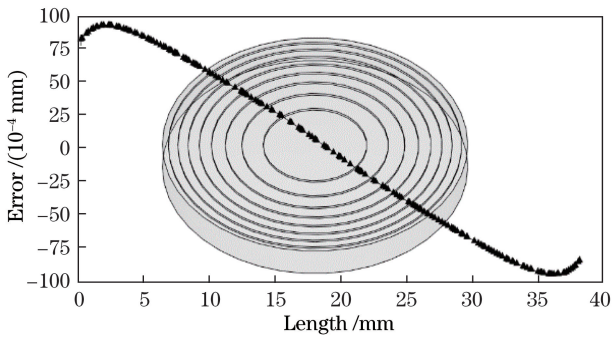


图 10 微结构周期宽度误差曲线

Fig. 10 Microstructure period error curve

单个周期的补偿量 $\Delta T_1'$ 。 ΔH_1 沿径向非均匀变化, 如图 11 所示, 可以将 ΔH_1 沿径向的变化曲线拟合为非球面进行补偿。对于一个确定的刀具半径 R , ΔH_2 和 ΔT_2 为一个定值且存在于每一个周期。最后可以得到补偿后衍射面的微结构高度为 $H + \Delta H_2$, 周期宽度为 $T + \Delta T_1' + \Delta T_2$, 误差补偿后的衍射面可以表示为

$$h(r)_{(H,T)} = \frac{\lambda_0}{n(\lambda_0) - 1} \cdot \frac{2\pi(a_1 r^2 + a_2 r^4 + \dots)}{2\pi},$$

$$\Delta h(r) = h(r)_{(H+\Delta H_2, T+\Delta T_1'+\Delta T_2)},$$

$$Z(r) = \Delta f(r) + \Delta h(r), \quad (4)$$

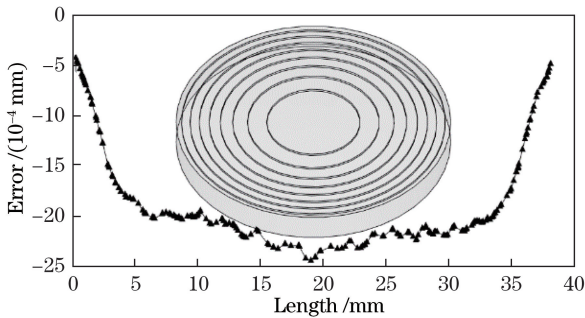


图 11 微结构高度误差曲线

Fig. 11 Microstructure height error curve

式中: $h(r)_{(H,T)}$ 为设计衍射面型的微结构分布函数; λ_0 为中心波长; $n(\lambda_0)$ 为中心波长处材料的折射率; r 为透镜的径向坐标; a_1, a_2 为相位系数; $\Delta h(r)$ 为补偿部分误差后得到的微结构高度和周期宽度生成的新的衍射面型; $\Delta f(r)$ 为 ΔH_1 拟合的非球面; $Z(r)$ 为补偿所有误差后生成的衍射面型。

4.2 实验方法和设备

注塑实验的材料与仿真材料相同, 实验中衍射面型的补偿利用 DIFFSYS 与 MATLAB 软件完成。设计衍射面型微结构分布函数的参数为: $a_1 = -5.805 \times 10^{-5}$, $a_2 = -9.0148 \times 10^{-9}$, $n(\lambda_0) = 1.508$, $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ 。注塑实验使用的设备是日本发

那科公司的 α -S150iA 精密注塑成型机, 模芯为通过 Nanoform 700 单点金刚石车床加工的镍铜合金, 检测仪器为 Dektak XTL 布鲁克台阶仪。

4.3 实验结果和讨论

实验中由于衍射微结构的周期为可变周期, 因此测量的周期宽度为相同的衍射环带。设计的衍射面的微结构高度为 $1.08 \mu\text{m}$, 周期宽度为 $250 \mu\text{m}$ 。通过 Dektak XTL 台阶仪测量模芯的衍射微结构结果如图 12 所示。模芯的平均微结构高度为 $1.052 \mu\text{m}$, 周期宽度为 $245.09 \mu\text{m}$ 。实验中首先在没有优化和补偿的情况下对微结构进行注塑成型, 结果如图 13 所示。平均微结构高度仅为 $0.574 \mu\text{m}$, 周期宽度小于 $200 \mu\text{m}$, 衍射面型存在较大的收缩凹陷。参数优化后成型的衍射微透镜结果如图 14 所示, 平均微结构高度达到 $0.8933 \mu\text{m}$, 周期宽度超过 $220 \mu\text{m}$ 。误差补偿后, 采用最佳参数组合的微结构注塑成型结果如图 15 所示。平均微结构高度达到 $1.0186 \mu\text{m}$, 误差为 5.69% , 周期宽度达到 $234.59 \mu\text{m}$, 误差为 6.16% , 满足误差小于 7% 的要求, 此外衍射面型的收缩问题也得到明显改善。

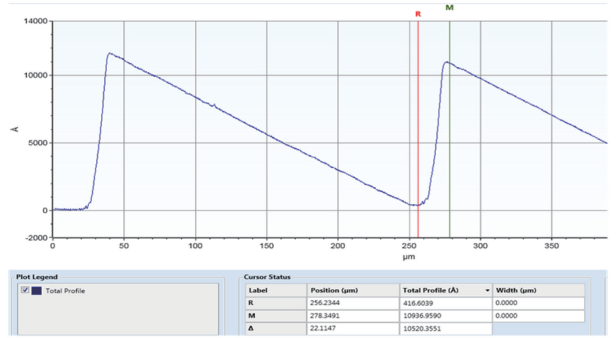


图 12 模芯微结构测量结果

Fig. 12 Mold core microstructure measurement results

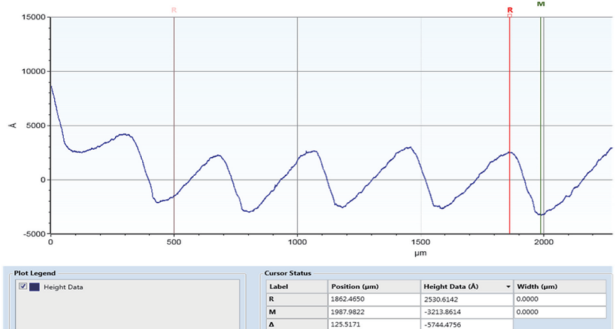


图 13 未优化的镜片测量结果

Fig. 13 Lens measurement results without optimization

5 结 论

提出了一种提高衍射微结构注塑成型精度的方

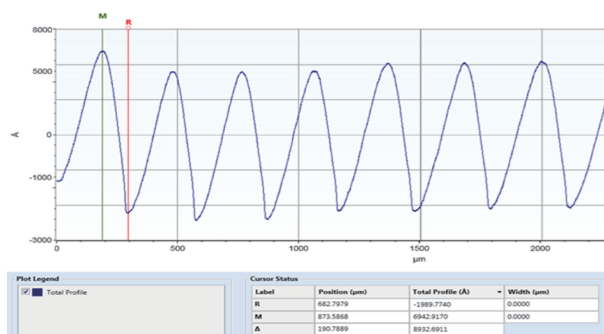


图 14 优化后镜片测量结果

Fig. 14 Lens measurement results after optimization

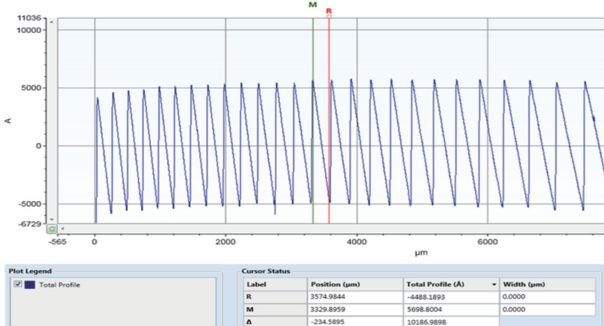


图 15 补偿后镜片测量结果

Fig. 15 Lens measurement results after compensation

法。采用 Taguchi 方法和加权综合评分法实现工艺参数的多目标优化,得到了微结构注塑成型的显著影响因素和最优工艺参数组合。结果显示,工艺参数优化后的塑件质量明显提高,并且较高的保压压力和模具温度以及适当的保压时间可以有效提高衍射微结构的复制度。分析了衍射微结构成型误差的来源,结果显示微结构成型误差主要包括注塑收缩误差和型芯加工误差,建立了微结构注塑成型的误差补偿模型。实验结果表明优化和补偿后的微结构高度误差为 5.69%,周期宽度误差为 6.16%,误差造成的衍射效率下降小于 2%,衍射微结构的注塑成型精度得到显著提高。

参 考 文 献

- [1] Liu X Q, Xue C X. Design of diffractive optical elements based on axicon and its light analysis [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55 (4): 040501.
刘晓庆, 薛常喜. 基于轴棱锥的衍射光学元件设计及其光场分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55 (4): 040501.
- [2] Li L X, Liu Q, Chen J M, et al. Polarization-independent broadband dielectric bilayer gratings for spectral beam combining system [J]. Optics

Communications, 2017, 385: 97-103.

- [3] Cui Q F. Design of hybrid diffractive-refractive imaging optical systems [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(1): 12-15, 38.
崔庆丰. 折衍射混合成像光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 12-15, 38.
- [4] Wang D Y, Xue C X, Li C, et al. Design of electronic endoscope optical system based on microlens array [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (2): 0222003.
王丹艺, 薛常喜, 李闯, 等. 基于微透镜阵列的电子内窥镜光学系统设计 [J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0222003
- [5] Wang Y, Meng X Y, Zhang L, et al. Design of super-wide-angle mobile phone camera based on concentric lens [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (10): 1022001.
王洋, 孟祥月, 张磊, 等. 基于同心透镜的超广角手机镜头设计 [J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1022001.
- [6] Carvalho E J, Braga E S, Cescato L H D. Replication of diffractive optical elements by injection molding [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5622: 739-744.
- [7] Holthusen A K, Riemer O, Schmütz J, et al. Mold machining and injection molding of diffractive microstructures [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 26: 290-294.
- [8] Lee B K, Kim D S, Kwon T H. Replication of microlens arrays by injection molding [J]. Microsystem Technologies, 2004, 10 (6/7): 531-535.
- [9] Vu L T, Chen C C A, Lee C C, et al. Compensating additional optical power in the central zone of a multifocal contact lens for minimization of the shrinkage error of the shell mold in the injection molding process [J]. Applied Optics, 2018, 57(12): 2981-2991.
- [10] Lan X R, Li C, Yang C, et al. Optimization of injection molding process parameters and axial surface compensation for producing an aspheric plastic lens with large diameter and center thickness [J]. Applied Optics, 2019, 58(4): 927-934.
- [11] Chen C C A, Lai C S, Yu C W, et al. Study on liquid crystal polymer molding for off-axial aspherical reflective grating optical element by injection molding process [C]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2065: 030008.
- [12] Kalima V, Pietarinen J, Siitonen S, et al. Transparent thermoplastics: replication of diffractive

- optical elements using micro-injection molding [J]. *Optical Materials*, 2007, 30(2): 285-291.
- [13] Yang H F, Xue C X. Diffraction efficiency evaluation for diamond turning of multilayer diffractive optical elements [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56 (7): 075101.
- [14] Kashyap S, Datta D. Process parameter optimization of plastic injection molding: a review [J]. *International Journal of Plastics Technology*, 2015, 19(1): 1-18.
- [15] Dick L, Risse S, Tünnermann A. Process influences and correction possibilities for high precision injection molded freeform optics [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2016, 5(4): 277-287 .
- [16] Yang H F. Studies on modified scalar diffraction theory of multilayer diffractive optical elements [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- 杨红芳. 多层衍射光学元件的标量衍射理论修正模型研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2018.