

红外菲涅尔透镜的注射超声辅助成型优化

刘军辉, 陈新度

引用本文:

刘军辉, 陈新度. 红外菲涅尔透镜的注射超声辅助成型优化[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 639–648.

LIU Jun-hui, CHEN Xin-du. Optimization of infrared fresnel lens by injection molding assisted with ultrasonic[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 639–648.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0639>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超精密切削机床机电系统设计及其Fresnel透镜模具切削实验

Electromechanical system in ultra-precision cutting machine tool and its application in processing of Fresnel lens mold

光学精密工程. 2015, 23(10z): 410–416 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152313.0410>

菲涅尔波带片及其在光学加速度传感器中的应用

Fresnel zone plate and its application in optical acceleration sensor

光学精密工程. 2016, 24(10s): 267–271 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0267>

基于液晶空间光调制器的多焦菲涅尔透镜

Multifocal Fresnel lens based on liquid crystal spatial light modulator

光学精密工程. 2016, 24(10s): 156–161 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0156>

微拱形阵列导光板快速热压成型与微光学应用

A rapid hot embossing of micro-arch array LGP and micro-optics application

光学精密工程. 2017, 25(9): 2421–2427 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172509.2421>

基于LED阵列光源的太阳模拟器

Solar simulator based on LED array light source

光学精密工程. 2018, 26(2): 307–315 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182602.0307>

文章编号 1004-924X(2020)03-0639-10

红外菲涅尔透镜的注射超声辅助成型优化

刘军辉^{1,2}, 陈新度^{2*}

- (1. 河源职业技术学院 机电工程学院, 广东 河源 517000;
2. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 为了提升聚合物红外菲涅尔透镜的光学性能, 以其表面微沟槽的成型质量为目标, 提出了一种高效的注射超声辅助成型方法, 并对工艺参数进行了综合质量优化。首先分析了超声振动对聚合物的加热和加压效应, 设计了一套一模两腔的对比试验模具; 接着以红外菲涅尔透镜的调制传递函数 MTF 和齿形平均高度 h 为优化质量目标, 设计了四步骤的多目标优化流程, 通过试验设计、基于 BP 神经网络的质量目标与注射工艺参数关系建模、基于 NSGA-II 的多目标优化和试验验证进行工艺参数的综合优化。实验结果表明: 该多目标优化流程具有很高的精度, MTF 和 h 的平均预测误差 MPE 分别为 4.16% 和 3.32%; 注射超声辅助成型的菲涅尔透镜微沟槽具有更高的复制质量, 其齿沟槽平均高度 h 增加了 15.6%, 且 h 值的波动量随着 h 值的增大而增大, MTF 值受齿高 h 均匀性的影响大于齿高 h 对其的影响。

关键词: 注射超声成型; 红外菲涅尔透镜; 多目标优化; NSGA-II; BP 神经网络

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202803.0639

Optimization of infrared fresnel lens by injection molding assisted with ultrasonic

LIU Jun-hui^{1,2}, CHEN Xin-du^{2*}

- (1. Mechanical and Electrical Engineering Institute, Heyuan Polytechnic, Heyuan 517000, China;
 2. Mechanical and Electrical Engineering Institute, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)
- * Corresponding author, E-mail: chenxindu@gdut.edu.cn

Abstract: In order to improve the optical properties of a polymer infrared Fresnel lens, an efficient injection method assisted by ultrasonic was proposed to improve the quality of microgrooves on the surface of polymer infrared Fresnel lens, and optimize the process parameters comprehensively. First, the effect of ultrasonic vibration on the heating and pressurizing of polymers was analyzed, and a comparative test mold with two cavities was designed. Then, the modulation transfer function (MTF) and average height h of the infrared Fresnel lens were used as quality objectives. A four-step multi-objective optimization process was considered. The comprehensive optimization of process parameters was carried out through experimental design of the relationship between quality objectives and injection process parameters based on a back propagation neural network, and multi-objective

收稿日期: 2019-08-13; 修订日期: 2019-10-20.

基金项目: 广东省科技计划资助项目(No. 2015B090921007); 广东省特色创新项目资助(No. 2018GKTSCX073)

optimization based on NSGA-II and experimental verification. The experimental results show that the multi-objective optimization process has high accuracy, and the average prediction errors of MTF and h are 4.16% and 3.32% respectively. The Fresnel lens grooves produced by injection molding assisted by ultrasonic have higher reproduction quality. The average groove height h increased by 15.6%, and the fluctuation of h values increased with increasing h value. The MTF value is more affected by h uniformity than by h .

Key words: injection assisted with ultrasonic; infrared fresnel lens; multi-objective optimization; NSGA-II algorithm; Back Propagation(BP) neural network

1 引言

近年来,随着光学级聚合物材料的发展,越来越多的光学元件开始采用聚合物材料进行成型加工。聚合物光学透镜的主要加工方法是注射成型和模压成型,前者因其高效、低成本和易实现自动化等特点,被光学制造领域大范围使用。菲涅尔透镜的主要功能是对光进行聚焦,通过去除透镜中间对折射没有影响的部分材料,可以减小透镜对光波的吸收,降低光能的损失。它的一个重要运用领域是进行高质量的红外成像,特别是在救援、夜间监视、夜间驾驶辅助以及热成像等方面的应用。聚合物红外菲涅尔透镜的成型难点在于把控其表面的微沟槽复制质量,聚合物在进行微沟槽填充时,入口处存在“犹豫效应”,只有当型腔压力足够大时,聚合物才能克服阻力进入微沟槽^[1];另外,当聚合物与模具型腔表面接触时会形成一层薄膜,也会妨碍聚合物对微型型腔的填充^[2]。因此对存在微型沟槽特征的塑料产品,有文献采取快速热循环系统,使其能快速控制模具温度以提高微结构的复制质量^[3];另外一种方法是对模具型腔进行抽真空,减小聚合物进入微沟槽的空气阻力^[4];针对微沟槽填充困难问题,聚合物光学制造行业最常用的简便方法是直接提高熔体温度和提高注射、保压压力^[5];然而,聚合物在模具型腔不同部位存在温度差和压力差^[6],分布在菲涅尔透镜同心圆的微沟槽必然也存在温度和压力不等的情况,从而影响微沟槽的复制质量。

为了解决红外菲涅尔透镜表面微沟槽的聚合物填充困难问题,本文提出一种注射超声辅助成

型技术,使包含表面微沟槽的型芯进行超声高频振动,破除聚合物填充阻力。超声波振动技术具有巨大的使用价值,在医学、工程探测、机械加工等领域被广泛运用^[7]。它在聚合物加工领域主要是用于加热塑化^[8]和塑料产品的超声键合^[9]。特别地,超声波振动技术也在聚合物的微结构压印方面得到了成功运用,通过对聚合物超声压印非成形面熔融缺陷形成的机理进行分析,并提出抑制方法^[10],接着对聚合物微结构进行热辅助超声波压印成形,取得了高质量的微结构^[11]。然而,将超声振动技术作为一种辅助方法直接用于高效的注射模具还没有相关报道。另外一个方面,生产工艺条件对注射产品质量同样起着重要作用,因此本文在进行注射超声工艺参数优化时,提出一套优化流程,结合试验设计、BP神经网络和遗传算法 NSGA-II 进行多目标质量优化,且通过实验验证最终确定优化方法的有效性。

2 红外菲涅尔透镜光学系统分析

本文以一个包含 2 个菲涅尔透镜的红外成像系统为例,如图 1(a)所示。菲涅尔透镜一般较薄,表面存在一定环数的同心圆微结构纹理,可以看成是把普通透镜中对表面曲率没有影响的部分进行去除,只留下透镜中有效的曲面折射部分。为了方便模具型芯端面的微结构加工,一般把微结构中的曲率曲面部分直接用斜面近似代替,截面呈现出等高度、由外到里规则排列的锯齿形状。本文中菲涅尔透镜的直径×厚度为:20 mm×1 mm,微沟槽的设计高度为 60 μm ,存在微沟槽的区域直径为 18 mm,共 7 个微沟槽环,如图 2 所示。

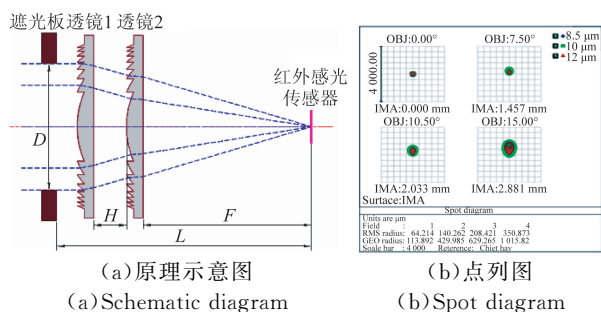


图 1 菲涅尔透镜红外热成像系统
Fig. 1 Fresnel lens infrared thermal imaging system

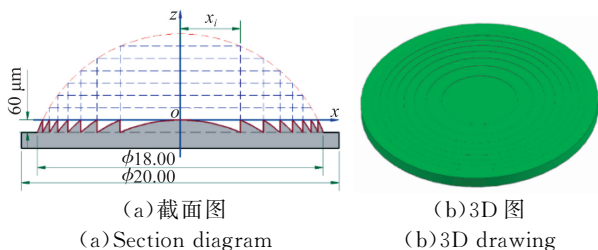


图 2 菲涅尔透镜结构
Fig. 2 Structure of Fresnel lens

表 1 菲涅尔透镜红外成像系统参数

Tab. 1 Parameters of Fresnel lens infrared imaging system

系统参数	数值	系统参数	数值
波长范围/ μm	8~13	入射孔径 D/mm	9
主波长/ μm	10	F 数	1.31
菲涅尔透镜焦距/ mm	10.96	视场角/ $^\circ$	30
系统焦距/ mm	10.215	总追迹距离 L/mm	16.7

将该成像系统参数输入 Zemax 光学软件,其中孔径 D 为 9 mm,2 个菲涅尔透镜的安装距离为 0.95 mm。当物距为无穷远时,系统的总焦距 F 为 10.215 mm;物距为 500 mm 时, F 为 10.386 mm,详细的设计参数如表 1 所示。另外,分别设置入射角度为 $0^\circ, 7.5^\circ, 10.5^\circ$ 和 15° 进行点列图仿真,结果如图 1(b) 所示,随着入射角的增大,在固定的焦平面上的点列图逐渐扩大,反映了聚焦效率下降。

3 注射超声成型原理及模具设计制造

3.1 超声振动产热理论分析

超声波是一种频率高于 20 KHz 的机械波,超声波振动系统一般由电源、换能器、变幅杆和工

具头组成。电源把 50 Hz 的电转变成所需频率的电,换能器由压电陶瓷的压电效应实现高频电能与机械能(超声波简谐振动)的转换。由于换能器产生的振动幅度在 $10 \mu\text{m}$ 左右,且超声波的能量与振幅的平方成正比,因此为了得到大能量的超声波,一般需要通过变幅杆对振幅进行放大。超声波在传播时,通过每一个截面的能量不变(忽略传播损耗),面积小的截面能量密度更大。当振动频率一定时,缩小截面面积可提高振幅。因此变幅杆为了放大振幅,可采取缩小杆件的截面面积的方式。

超声波在聚合物材料中传播产生机械功,其表现形式是聚合物因振动产生连续交替的压缩、解压过程。Nonhof 等^[12]在进行超声波焊接的研究时,提出了黏弹热的产热观点。由于聚合物具有黏弹性,交变应力的加载和卸载曲线不能完全重合,而是形成了一个闭合的回路,其包围的面积代表了聚合物内部聚集的能量,并且以热能的形式表现出来。利用黏弹性聚合物的复动态模量描述的本构关系,从功与能量的角度推导从 0 到 t 时刻单位体积上的能量关系为:

$$W = \int_0^t \sigma(t) d\epsilon(t) = \frac{1}{4} E' \epsilon_0^2 (\cos 2\omega t - 1) + \frac{1}{4} E'' \epsilon_0^2 (2\omega t - \sin 2\omega t) = W_1 + W_2, \quad (1)$$

其中:复数模量 $E'' = E' + iE''$, E' 为储能模量,与载荷同相位,表示能量以势能形式存储; E'' 为损耗模量,与载荷相差 90° 相位,表示能量以黏弹性热形式耗散。 ϵ_0 和 ω 分别为超声波振幅和角频率。 W_1 为聚合物的弹性储能。转化为黏弹热的部分是 W_2 ,它是由斜率为 $(E'' \omega \epsilon_0^2)/2$ 的线性增加与 $-(E'' \sin \omega t)/4$ 波动量的合成,随着时间的增加 W_2 为正值且不断增加。聚合物的温度对 E'' 影响很大,当温度在玻璃转化温度附近时, E'' 迅速升高,对 W_2 的大小起决定作用。Chinnadura 等^[13]在研究超声波焊接产热现象时,通过实验测试 PC/ABS 在玻璃转化温度附件的温度升高量,发现聚合物在 0.02 s 内升温高达 55°C 。

另外,振动棒前端面 t 时刻施加给聚合物的瞬时压强为:

$$P(t) = \frac{F(t)}{S} = -\frac{m\epsilon_0\omega^2}{S} \sin \omega t, \quad (2)$$

其中: m 为整个超声波振动棒的质量,超声波频率 f 与角频率 ω 存在关系 $\omega = 2\pi f$ 。由于超声波

的频率非常高,且作用在聚合物微结构区域的瞬时压强与频率的平方成正比,因此当振动棒高速冲击聚合物时,振动棒端面与聚合物的接触面受到的压强非常大。在振动棒高频率的冲击下,对克服聚合物的微型腔填充阻力非常有利,从而提高微结构的复制质量。

3.2 注射超声模具设计

为了对比注射成型与注射超声辅助成型对菲涅尔透镜表面微沟槽的成型质量,模具结构采取一模两腔的大水口模具(CI 类型)。一个型腔用于注射超声成型,另外一个型腔则用传统的注射成型方法,通过两个型腔注射成型的菲涅尔透镜进行质量评价。

注射模具的核心部件一般是直接参与成型的模仁部分,即分型面的设计及型腔镶件设计。该菲涅尔透镜外形结构简单,可全部在后模仁成型,前模仁只需要在成型部位进行抛光即可。为了保证前后模仁的对合精度,在其四个角设计虎口定位;进胶方式采取侧向扇形进胶,分流道进胶口的高度为 0.5 mm;冷却方式设计为环绕形式,冷却水路直径为 $\Phi 4.0$ mm;为了简化模具结构,产品以手动吸盘脱模进行取件。前后模仁的整体尺寸分别为 $70\text{ mm} \times 110\text{ mm} \times 20\text{ mm}$, $70\text{ mm} \times 110\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,其 NX 设计模型和加工实物如图 3 所示。

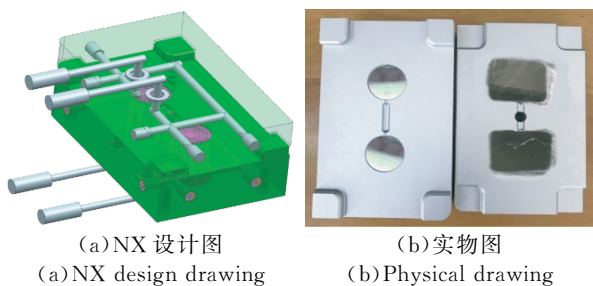


图 3 模仁设计和加工

Fig. 3 Design and manufacturing of mold cavity

采取的超声波振动系统频率为 28 kHz,并且配备可调功率的超声波电源,模架依据模仁尺寸选择 LKM CI-1518-A40-B50-C60 型号,超声振动系统伸出了模具底部,模具的三维整体结构如图 4(a)、图 4(b)所示。在对超声振动系统进行安装时,同样需要在其振幅为 0 的附件进行安装,保证超声振动效果,不影响传达到表面齿环微沟槽的超声振幅强度,该超声波振动系统的长度为 180 mm。

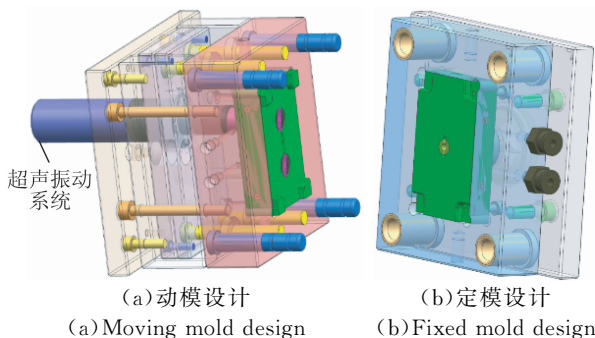
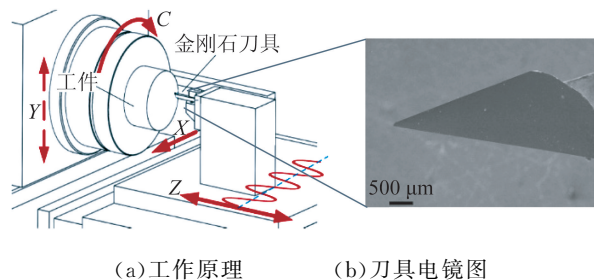


图 4 模具三维结构

Fig. 4 3D mold structure

3.3 模具型芯表面微沟槽加工

为了保证微沟槽的加工精度,本例的菲涅尔透镜模具型芯表面的微沟槽选择超精密单点金刚石车床 Nanotech 350FG 进行加工,其中 3 个直线运动轴采取的是油静压线性导轨,在满行程的情况下其直线度不大于 $0.3\ \mu\text{m}$ 。车床的工作原理如图 5(a)所示,Y 轴采取的是双直线电机驱动,最大行程为 150 mm,且具有任意位置的自锁功能;C 旋转轴采取对称设计,热稳定性高,可保证优良的动静刚性。该设备加工精度为纳米级,非常适合光学元件及超精密机械件的加工。模具型芯的关键部位是其端面的微沟槽,由于沟槽底部存在尖点,因此需要尖角金刚石刀具,本例中选择的小半径 R 为 $2\ \mu\text{m}$,其电镜放大图如图 5(b)所示。



(a) Working principle (b) Tool electron microscopy

图 5 车削系统

Fig. 5 Turning system

加工得到的模具型芯如图 6(a)所示,局部放大电镜图如图 6(b)所示,其加工轮廓清晰,通过白光干涉仪对 7 个齿环微沟槽进一步精密测量,其平均齿高为 $(60 \pm 0.003)\ \mu\text{m}$,通过上述超精密车床加工的模具型芯表面齿环微沟槽具有很高的尺寸精度,其中第 2 个齿的高度为 $60.002\ \mu\text{m}$,如

图 6(c)所示。模具型芯中间部位的凹形 3D 形貌及其轮廓截面如图 6(d)、图 6(e)所示。

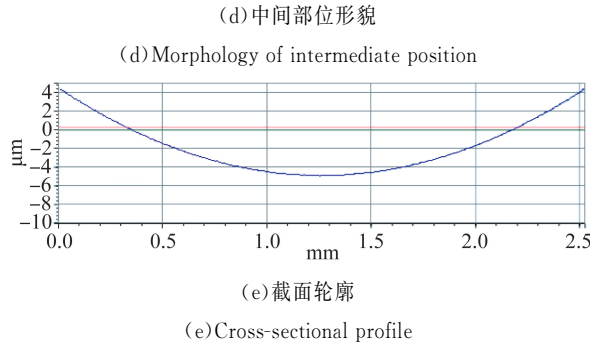
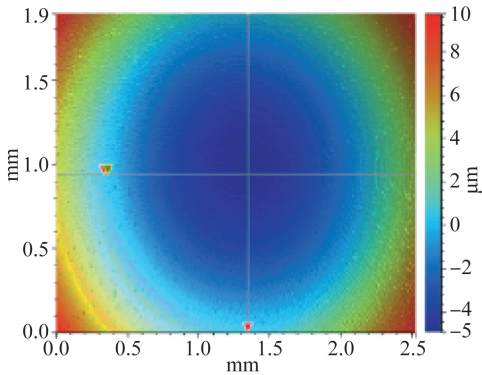
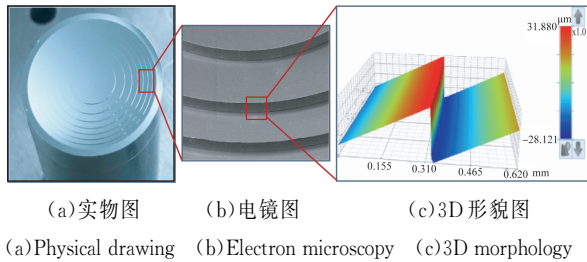


图 6 模具型芯

Fig. 6 Mold core

4 多目标优化算法改进及方案规划

4.1 非支配排序遗传算法 NSGA-II 原理

在多目标优化问题上,具有代表性的智能算法 NSGA-II 是由 Deb^[14]在 NSGA 算法基础上开发的,在工程领域得到了广泛地运用。其主要特点为:为了降低计算的复杂程度,采取快速非劣分类的排序法;为了保证非支配解能进入下一代,采取了精英策略;为了维持种群的多样性,设计了拥挤机制。NSGA-II 算法的基本流程如下:

Step 1: 选择基因编码策略,把变量集合 X 和域转为二进制串结构空间 S ;

Step 2: 定义适应度函数 $f(X)$;

Step 3: 确定个体选择、交叉、变异的遗传策略,同时确定交叉概率 p_c ,变异概率 p_m 等参数;

Step 4: 随机初始化产生群体 P ;

Step 5: 计算位串解码的个体适应值 $f(X)$;

Step 6: 通过选择、交叉、变异算子对群体操作,得到下一代新群体;

Step 7: 对群体性能进行判断,如果满足设定要求或达到预定的迭代次数,程序结束,否则返回 Step 6。

4.2 多目标优化流程设计

为了对注射超声工艺参数进行精确地优化,本文在前期工作的基础上,提出了一套 4 阶段优化流程^[15],如图 7 所示,整体上分为试验设计、质量目标与注射工艺参数关系建模、多目标优化 (NSGA-II) 及试验验证 4 个步骤。试验设计部分,采取田口法结合方差分析,对影响质量目标的关键工艺参数进行筛选,并且初步对注射工艺参数进行优化,接着对筛选出的关键参数进行全因子试验;关系建模部分,为了得到关键工艺参数与质量目标的非线性映射关系,以第一步全因子试验获取的数据作为样本,采取 BPNN (Back Propagation Neural Network) 算法^[16]进行模型构建,并对其预测精度进行验证,提高模型的泛化能力;多目标优化部分,以第二步得到的质量目标与关键参数之间的 BP 神经网络作为适应度函数,通过 NSGA-II 算法经过选择、交叉、变异运算之后,得到均衡的 Pareto 最优解集;试验验证部分,在 Pareto 最优解集中选择几组参数组合进行实际的注射试验,对优化结果进行有效性验证。

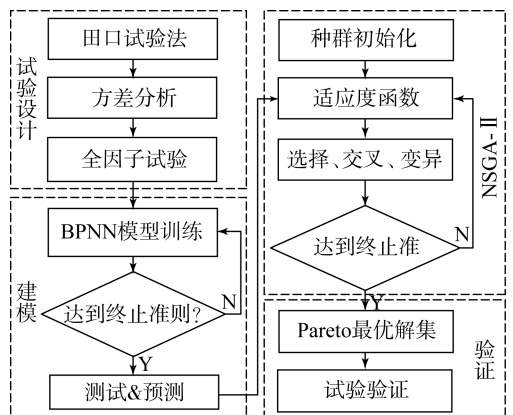


图 7 多目标优化流程图

Fig. 7 Flow chart of multi-objective optimization

5 实验结果与分析

5.1 成型工艺初始条件设置

通过设计制造一模两腔的试验模具,即一个型腔采取注射超声辅助成型(型腔 1),另外一个则采取常规的注射成型(型腔 2),这样两个型腔获得的注射参数相同,尽量排除了干扰因素。本节将对型腔 1 采取注射超声辅助成型工艺参数优化,对型腔 2 采取常规的注射成型,从而可对两种方法成型的菲涅尔透镜进行质量对比。本例选择的两个质量评价目标是菲涅尔透镜微沟槽的平均齿高 h 和调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)值,成型的产品这 2 个质量目标都具有望大特性,微沟槽高度越大说明微结构的复制度越高,轮廓越清晰,MTF 值越大则说明红外热成像分辨率越高。在进行传统注射成型与注射超声辅助成型试验对比时,需要进行两类注射试验:第一类是注射超声辅助试验,只收集型腔 1 的样品进行测试,而型腔 2 成型的样品不予考虑。如图 7 所示的技术路线,依据生产经验设置初始注射超声注射工艺参数,通过田口试验法筛选出关键的工艺参数,进行全因子注射试验,试验结果作为 BPNN 模型的训练数据与预测精度检验数据,建立的优化目标与工艺参数之间的非线性模型作为多目标优化算法(NSGA-II)的适应度函数,限定关键工艺参数的范围,设置合理的种群规模、迭代次数及变异概率等算法参数,则可得到 2 个质量目标的非支配解集;第二类是传统的注射成型试验,此时超声振动系统关闭,即不考虑超声振动参数,在第一类试验得到的非支配解集中选择一组工艺参数进行注射成型试验,此时只收集型腔 2 的成型样品进行测试,而型腔 1 成型的样品不予考虑。通过这两类试验则可以对比在相同的注射工艺参数基础上,加入超声振动是否对这 2 个质量目标有改进作用。

材料选择适合红外探测的优等品聚合物高密度聚乙烯 HDPE(HMA-016),其融化温度为 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、在红外波长为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时,红外透光率为 82% 。超声振子频率为 35 kHz ,配备可调功率的电源;注塑机同样采取 DQ-50T 卧式精密注塑机。考虑到能量问题,超声波振动系统选择功率和振动时间作为可变工艺参数。在一定的频率下,超声波振动系统的功率越大,振幅也越大,因此对微沟槽附件的聚合物作用也越大。注射工艺变量选择注射速

度与保压压力。4 个参数可进行 3^4 全因子试验,其工艺参数及水平如表 2 所示,试验结果作为 BPNN 的训练与测试样本。根据聚合物供应商的建议和生产经验,设置注射工艺基础参数如下:熔体温度为 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$,模具温度为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$,注射压力为 90 MPa ,保压时间为 4 s ,V/P 转换位置为 3.2 mm ,锁模力为 150 kN ,冷却时间为 6 s 。

表 2 注射超声振动工艺参数及其水平

Tab. 2 Process parameters and theirs levels for experiments

参数	水平 1	水平 2	水平 3
注射速度 IS/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	50	60	70
保压压力 PP/MPa	60	70	80
功率 PW/W	800	1 000	1 200
振动时间 VT/s	0.5	1.5	2.5

5.2 菲涅尔透镜的多质量目标优化实验

针对本例菲涅尔透镜的成型质量评价,采取的 2 个质量目标是微沟槽的平均高度 h 和 MTF 值,通过 NSGA-II 算法,配合多目标优化设计流程(图 7)进行优化。微沟槽的平均高度 h 和 MTF 值分别用 Bruker GT-X 白光干涉仪和 ImageMaster[®] HR 红外测试仪进行测量。白光干涉仪测试时使用绿光,其 Threshold 降到 1% ,同时采取 VSI 模式,backscan 和 length 分别设置为 70 和 80。红外测试仪的空间频域范围设为 $1\sim 10\text{ lp/mm}$,感应角度为 30° ,中心波长为 $10\text{ }\mu\text{m}$,波长范围为 $8.2\sim 12.8\text{ }\mu\text{m}$,其余参数为默认。其中,MTF 值以空间频率为 5 lp/mm 时的测量值为准进行研究。

为了排除干扰因素,保证实验结果的准确性,本文分别检测直径方向的 7 个微齿高度,得到成型齿高的平均值,其能够反映微沟槽的复制程度。注射超声实验结果数据作为训练样本对 BP 神经网络模型进行训练,并分析其预测的准确性。BP 神经网络模型设置如下:采用 3 层网络结构,其中隐含层节点数为 7;以 4 个工艺参数作为网络的输入,2 个质量目标作为网络输出;迭代次数为 1 000,学习率为 0.01,梯度为 $1\text{E-}10$,其余参数为默认。BP 神经网络算法对微沟槽的平均高度 h 的预测值与实际值对比如图 8 所示,其 R^2 为 0.963;对 MTF 的预测值与实际值(在视场角 15° 、空间频率为 20 lp/mm 的条件下)对比如图 9 所示,其 R^2 为 0.916。因此,针对 2 个质量目标构建的 BP 神经网络模型具有很高的预测精度,可作为 NSGA-II 的适应度函数进行优化。

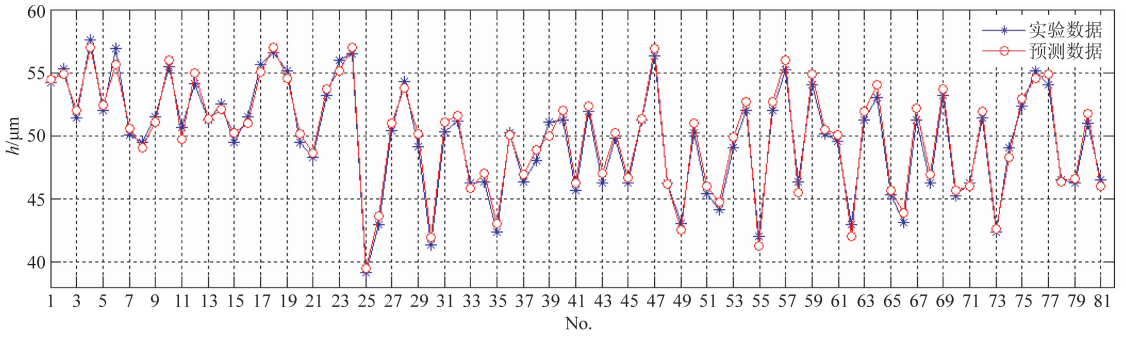


图 8 平均高度 h 的预测值与实际值对比

Fig. 8 Comparison between predicted and actual values of h

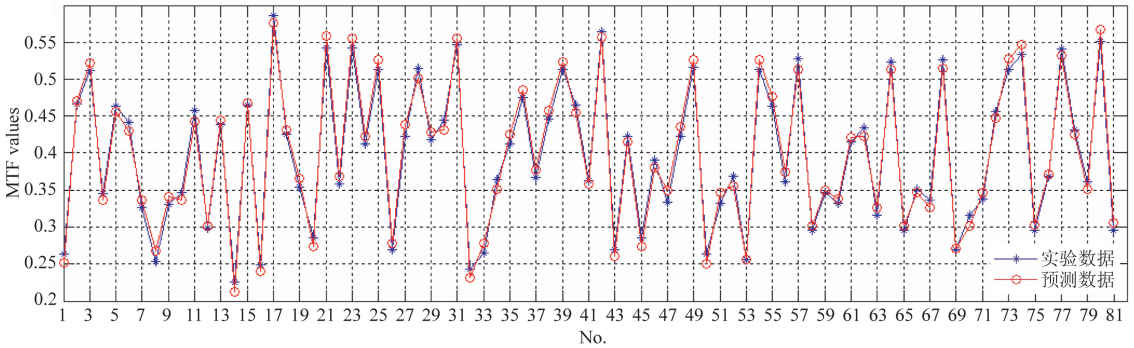


图 9 MTF 的预测值与实际值对比

Fig. 9 Comparison between predicted and actual values of MTF

为了得到更多的最优解来进行比较,NSGA-II 算法运行参数设置如下:种群数为 500,最大迭代次数为 400,适应度函数公差为 $1E-100$,变异概率为 0.25,交叉概率为 0.8,Pareto 系数为 0.1。经过 NSGA-II 算法迭代运算,Pareto 最优解集有 $100 \times 0.1 = 50$ 个解,结果如图 10 所示,选择 5 个均匀分散的最优解(红色标记),对优化的工艺参数和相应的质量目标进行近似处理,结果如表 3 所示(彩图见期刊电子版)。

表 3 红色标记最优解结果

Tab. 3 Optimal solutions of red markers

No.	工艺参数				MTF	$h/\mu\text{m}$
	IS/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	PP/MPa	PW/W	PT/s		
1	61.1	68.3	964.6	1.4	0.268	53.235
2	59.4	74.7	977.2	1.1	0.324	45.788
3	63.7	65.2	1 023.6	1.8	0.376	40.577
4	65.3	63.6	1 036.7	1.4	0.462	37.321
5	67.7	61.9	1 064.6	1.6	0.551	34.548

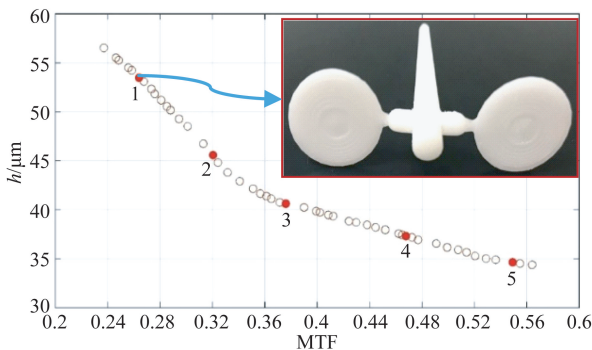


图 10 NSGA-II 算法对 MTF 和 h 的优化结果

Fig. 10 Optimal solutions for MTF and h using NSGA-II algorithm

5.3 实验结果分析

为了判断优化结果的准确性,以图 10 中 5 个红色标记的最优解进行分析。采取平均预测误差 (Mean Prediction Error, MPE) 作为衡量指标:

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \tilde{y}_i|}{y_i} \times 100\%, \quad (3)$$

其中: y_i 为质量目标第 i 次试验结果, \tilde{y}_i 为质量目标第 i 次预测结果, n 为总试验次数。得到对比结果如表 4 所示,MTF 和 h 的 MPE 分别为 4.16% 和 3.32%,说明该多目标优化流程具有很好的效果。

表 4 MTF 和 h 的最优解验证实验结果Tab. 4 Confirmation experimental results for optimal solutions of MTF and h

No.	优化结果		实验结果		预测误差	
	MTF	$h/\mu\text{m}$	MTF	$h/\mu\text{m}$	MTF/%	$h/\%$
1	0.268	53.235	0.257	51.956	4.28	2.46
2	0.324	45.788	0.331	46.976	2.11	2.53
3	0.376	40.577	0.413	42.364	8.96	4.22
4	0.462	37.321	0.451	38.468	2.44	2.98
5	0.551	34.548	0.568	36.145	2.99	4.42
MPE	—	—	—	—	4.16	3.32

注射超声辅助成型的菲涅尔透镜,其 MTF 取值范围为 $[0.226, 0.586]$, h 取值范围为 $[39.124, 57.623]$ 。图 10 中最右边端点的 MTF 值为 0.571,最左边端点的 h 值为 $57.163 \mu\text{m}$ 。以表 3 中第 1 号实验为代表进行成型质量分析,齿环微沟槽的电镜扫描和白光干涉 3D 形貌如图 11 所示。

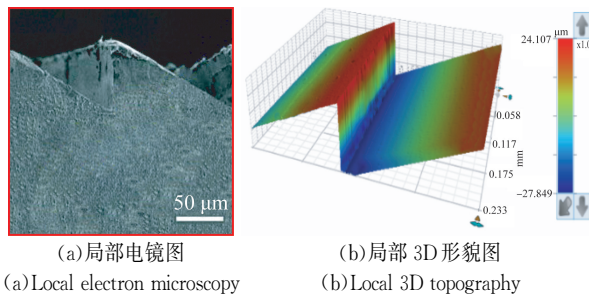


图 11 菲涅尔透镜微沟槽测试

Fig. 11 Fresnel lens microgroove test

在相同的注射工艺条件下,注射速度为 63.7 mm/s 、保压压力为 65.2 MPa 、熔体温度为 $190 \text{ }^\circ\text{C}$ 、模具温度为 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 、注射压力为 90 MPa 、保压时间为 4 s 、V/P 转换位置为 3.2 mm 、锁模力为 150 kN 、冷却时间为 6 s 、常规注射成型工艺得到的齿环微沟槽平均高度为 $46.237 \mu\text{m}$ 、齿尖部位复制成型质量不佳,变成了圆角,表明聚合物无法进入型芯表面狭小的尖角缝隙;而注射超声辅助成型的齿环微沟槽平均高度达到 $51.956 \mu\text{m}$ 、齿尖部位复制成型质量明显提高,高度提升了约 12.4% ;另外,反映微沟槽高度的均匀性,注射成型和注射超声辅助成型的误差限分别为 $[-1.236, 1.417]$ 和 $[-1.853, 2.031]$,跳动范围

增大了 48.1% ,如图 12 所示。因此,相对于常规注射成型工艺,在微结构端面引入超声振动明显可以提升聚合物的复制程度。

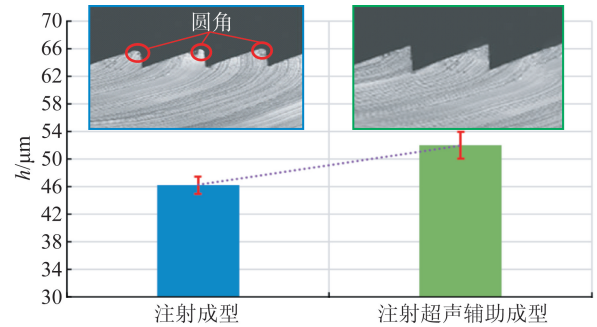


图 12 微沟槽的注射成型与注射超声辅助成型质量对比
Fig. 12 Comparison of injection molding and injection molding assisted with ultrasonic for micro-groove

在感应角度为 30° 、视场角为 15° 的情况下,当空间频率为 5 lp/mm 时,注射成型和注射超声辅助成型的 MTF 值分别为 0.189 和 0.257,提升了约 36% 。图 13 中显示了在表 3 中 1 号注射工艺条件下,注射成型与注射超声辅助成型的 MTF 曲线对比。注射超声辅助成型的菲涅尔透镜在低空间频域 ($0, 4.5]$ 范围内,其 MTF 值明显高于注射成型的透镜,而在更高的空间频域范围内则提升较小,说明采取注射超声辅助成型能够有效提升该透镜的红外成像清晰度,特别是在低空间频域范围内改善幅度更大。

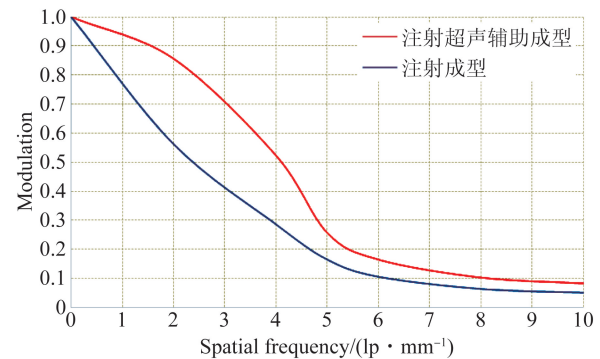


图 13 注射成型与注射超声辅助成型的产品 MTF 曲线对比
Fig. 13 Comparison of MTF curves between injection molding and injection molding assisted with ultrasonic

本文选择的 2 个优化目标是红外调制传递函数 MTF 和齿形平均高度 h ,MTF 反映成像的清晰程度,范围在 $[0, 1]$ 之间,值越大代表图像越清晰; h 代表菲涅尔透镜微沟槽的复制质量,值越大

代表成型质量越高。因此,都期望2个优化目标的数值尽量大。依据常理推断,这2个优化目标应该是相互关联的,即 h 值越大说明成型质量越高,成像清晰度(MTF)也应该更高,但是从表4中可以发现, h 值越大MTF值反而越小。通过对注射超声辅助成型的菲涅尔透镜同一个径向截面测量(7个 h 值)发现,其 h 值与其波动量呈现明显的正相关关系,即 h 值越大,其波动量越大。因此,菲涅尔透镜的成像质量不仅受齿环高度的影响,还与其均匀性有直接关系,而且齿环高度的均匀性对该透镜的红外成像清晰度的影响更大。

6 结 论

本文以一个红外成像系统的菲涅尔透镜为例,首先对红外成像系统进行了光学分析,针对菲涅尔透镜表面存在的环形微齿,设计并精密加工

了模具型芯,并依据超声波振子特点设计了相配的注射模具;通过对注射超声辅助成型的实验研究,建立了微结构平均齿高 h 和调制传递函数MTF的BPNN模型,并进行了多目标优化运算,最后与常规注射成型的微结构进行实验对比研究。本章得到的结论有以下两点:

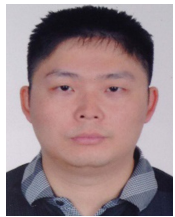
通过全因子试验训练得到的BPNN具有很好的预测精度, h 和MTF模型的 R^2 分别为0.963和0.916;采取本文的多目标优化流程具有良好的优化效果,优化结果与试验结果对比,MTF和 h 的平均预测误差MPE分别为4.16%和3.32%;相对于常规注射成型,注射超声辅助成型对微沟槽的复制能力明显更高。由于对微沟槽的聚合物产生超声加热和瞬间高压效应,本例中菲涅尔透镜的齿沟槽平均高度 h 增加了15.6%, h 值的波动量随着 h 值的增大而增大,且MTF值受齿高 h 均匀性的影响大于齿高 h 的影响。

参考文献:

- [1] WU Y, GONG Y, CHA K J, *et al.*. Effect of microstructures on the shrinkage of injection molding product [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(3):1357-1363.
- [2] SORGATO M, BABENKO M, LUCCHETTA G, *et al.*. Investigation of the influence of vacuum venting on mould surface temperature in micro injection moulding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(4): 547-555.
- [3] KITAYAMA S, ISHIZUKI R, TAKANO M, *et al.*. Optimization of mold temperature profile and process parameters for weld line reduction and short cycle time in rapid heat cycle molding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(5): 1735-1744.
- [4] SORGATO M, MASATO D, LUCCHETTA G. Effect of vacuum venting and mold wettability on the replication of micro-structured surfaces [J]. *Microsystem Technologies*, 2016, 23(7): 2543-2552.
- [5] MASATO D, SORGATO M, LUCCHETTA G. Characterization of the micro injection-compression molding process for the replication of high aspect ratio micro-structured surfaces [J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(8): 3661-3670.
- [6] ELDUQUE A, ELDUQUE D, CLAVERÍ A, ISABEL, *et al.*. Influence of material and injection molding machine's selection on the electricity consumption and environmental impact of the injection molding process: An experimental approach [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2018, 5(1):13-28.
- [7] 杨辰龙,冯玮,边成亮,等. 基于超声背散射信号递归分析的金属材料微缺陷识别 [J]. *光学精密工程*, 2019,27(4):932-944.
YANG CH L, FENG W, BIAN CH L, *et al.*. Micro defects detection in metallic materials based on recurrence analysis of ultrasonic backscattering signal [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4): 932-944. (in Chinese)
- [8] WU W, PENG H, JIA Y, *et al.*. Characteristics and mechanisms of polymer interfacial friction heating in ultrasonic plasticization for micro injection molding [J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(5): 1385-1392.
- [9] 刘冲,孟凡健,梁超,等. 超声波键合熔接结构及压力自平衡夹具 [J]. *光学精密工程*, 2018,26(3): 672-679.
LIU CH, MENG F J, LIANG CH, *et al.*. A joint structure and self-balancing jig based on ultrasonic bonding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(3): 672-679. (in Chinese)

- [10] 祁娜, 罗怡, 王晓东, 等. 聚合物超声压印非成形面熔融缺陷形成机理及抑制 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(2):452-458.
 QI N, LUO Y, WANG X D, *et al.*. Mechanism and avoiding of polymer melting on non-forming surface during ultrasonic embossing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2):452-458. (in Chinese)
- [11] 罗怡, 闫旭, 陈莉, 等. 聚合物微结构热辅助超声波压印成形 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(5):1220-1226.
 LUO Y, YAN X, CHEN L, *et al.*. Replication of polymer microstructure using thermal-assisted ultrasonic embossing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5):1220-1226. (in Chinese)
- [12] NONHOF C J, RIEPEN M, MELCHERS A W. Estimates for process conditions during the vibration welding of thermoplastics [J]. *Polymer Engineering & Science*, 1996, 36(15): 2018-2028.
- [13] CHINNADURAI T, NATESH M, VENDAN S A, *et al.*. Experimental studies on thermo-mechanical behavior of ultrasonically welded PC/ABS polymer blends [J]. *Silicon*, 2017, 10(9):1-12.
- [14] DEB K P A, AGARWAL S, MEYARIVAN T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2012, 6: 182-197.
- [15] JUNHUI L, XINDU C, ZEQUIN L, *et al.*. Multiobjective optimization of injection molding process parameters for the precision manufacturing of plastic optical lens [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017:1-13.
- [16] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAMS R J. Learning internal representation by back-propagation of errors [J]. *Nature*, 1986, 323 (323): 533-536.

作者简介:



刘军辉(1981—),男,江西赣州人,博士研究生,副教授,2010年于华中科技大学获得硕士学位,主要从事精密聚合物光学元件的成型研究。E-mail: 348060604@qq.com

导师简介:



陈新度(1967—),男,湖南望城人,教授,博士生导师,1989年、1992年、1995年于华中科技大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事精密光学制造方面的研究。E-mail: chenxindu@gdut.edu.cn