

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306290

微米尺度孔径微透镜阵列残余应力测量及分析*

许全忠 庞阔 陈诚 王延来

(天津商业大学生物技术与食品科学学院 天津 300314)

摘要:微透镜阵列在现代光学领域发挥着重要作用,对阵列器件进行残余应力测量从而评价器件质量,指导优化制造工艺具有切实的研究意义。现有的测量研究多着重于对阵列器件整体进行应力测量,对微透镜单元的应力分布尚未有系统的测量研究。本文基于双折射原理,分别使用光弹系统/偏光显微镜,在宏观/微观尺度对不同基底厚度(0.5 mm/1 mm),不同单元排布方式(相切排布/紧密排布),不同微透镜单元口径(126 μm /1 mm)的微透镜阵列器件进行了测量研究,并对器件整体(宏观)应力分布规律和透镜单元(微观)应力分布进行了比对和总结。实验结果表明:微透镜阵列的残余应力分布较为均匀,器件宏观残余应力分布与微观区域残余应力存在较为显著的趋同性;在厚度相同的前提下,排布方式、孔径尺寸对残余应力分布影响较小;当阵列器件厚度由1 mm减小至0.5 mm时,方形孔径微透镜阵列,同一区域残余应力增加约250%;圆形孔径微透镜阵列,同一个测量区域下残余应力增加约150%。相同孔径/排布/区域内的残余应力增幅明显。

关键词:微透镜阵列;双折射效应;残余应力;微注塑

中图分类号: TN206; TN256

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 140.3099

Measurement and analysis of residual stress in microlens array with micro aperture

Xu Quanzhong Pang Kuo Chen Cheng Wang Yanlai

(School of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: Microlens array plays an important role in the field of modern optics. It is of practical significance to evaluate the quality of array devices by measuring residual stress and guiding the optimization of manufacturing process. Most of the existing measurement studies focus on the stress measurement of the whole array device, but the stress distribution of the microlens unit has not been systematically measured. Based on the principle of birefringence, this paper uses photoelastic system/polarizing microscope respectively to measure and study microlens array devices with different base thickness (0.5 mm/1 mm), different unit arrangement (tangent arrangement/tight arrangement) and different microlens unit calibers (126 μm /1 mm) at macro/micro scale. The stress distribution law of the whole device (macroscopic) and the stress distribution of the lens unit (microscopic) are compared and summarized. The experimental results show that the residual stress distribution of the microlens array is uniform, and there is a significant convergence between the macro residual stress distribution and the micro residual stress. Under the premise of the same thickness, the distribution of residual stress is less affected by the arrangement and aperture size. When the thickness of the array decreases from 1 mm to 0.5 mm, the residual stress in the same area of the square aperture microlens array increases by about 250%. For the thickness of the circular aperture microlens array, the residual stress increases by about 150% in the same measuring area. The residual stress increases significantly within the same aperture/configuration/region, decreases from 1 mm to 0.5 mm, the residual stress in the same observation area increases by about 150%.

Keywords: microlens array; birefringent effect; residual stress; microinjection molding

收稿日期: 2023-02-28 Received Date: 2023-02-28

* 基金项目:天津市教委科研计划项目(2021KJ175)、大学生科技创新项目(JDG21054)、天津市研究生科研创新项目(2021YJSS289)、天津市高等学校大学生创新创业训练计划项目(202110069001)资助

0 引言

近年来,微光学元件得到了快速的发展,其中微透镜阵列作为重要的微光学元件之一,在仿生复眼系统^[1]、光学扫描系统^[2]、机器视觉系统^[3]以及光场成像系统^[4]等各个领域有着广泛的应用。微光学元件呈现出体积小、重量更轻、面型质量更高的发展趋势,微透镜阵列的单元孔径已经达到了微米/亚微米级^[5]。随着制造精度和工艺的升级,微透镜阵列的透镜单元面型日趋复杂、阵列基底多曲面化,从而满足透镜阵列多样化的使用需求^[6-9]。采用微切削加工工艺制造阵列器件模具并配合微注塑工艺制造微透镜阵列,是一种低成本、大批量生产阵列器件的加工方式。而在微注塑过程中,因为熔体的非等温流动和不均匀冷却等因素会引起器件内部产生残余应力。在物理特性方面,残余应力引起应力集中^[10-12]会使器件整体发生翘曲和收缩,导致抗击冲击性能降低,甚至在使用过程发生断裂失效;在光学性能方面,残余应力产生的会影响阵列器件的透光率、雾度。由其产生的双折射现象会导致经过透镜单元的光线发生偏离,影响器件的聚焦性能;因此,对微透镜阵列器件内部残余应力分布和测量对评价器件性能、指导加工过程、保证器件正常工作有着重要意义。

光学注塑器件残余应力的测试方法主要分为破坏性和非破坏性两类。剥层法、化学探针法和钻孔法^[13-15]是破坏性测试的3种主要手段,通过对待测器件进行材料移除,观察移除部分的应变情况从而较为准确的推算出器件内部的残余应力分布。非破坏性测试方法主要以基于双折射现象的光弹法为主,对于各类透明无定形材料,其内部的残余应力会导致光波沿不同方向通过时传播速率不同,从而出现光程差,即双折射现象^[16-18]。通过观察待测件在平面偏振光场或圆偏振光场中待测表面的干涉条纹的分布状况,从而得到残余应力的分布状况。

国内外的学者和研究机构针对微透镜阵列器件的整体残余应力分布状况进行了较为系统的研究。孙磊磊等^[19]、蒋丰泽等^[20]、邱庆军等^[21]对注射-压缩成型中选用不同工艺参数组合对微透镜阵列的双折射率变化和残余应力大小进行了测试,进一步表明残余应力对于微透镜阵列光学性能的影响,结果表明模具温度、压缩延迟时间、熔体温度对残余应力的变化起主要作用,同时合适的工艺参数组合可以显著降低微透镜阵列中的残余应力。Tao等^[22]对热压玻璃透镜中残余应力大小和分布进行了测试,先验证了光弹实验法得到的残余应力和采用结构松弛模型数值模拟预测结果吻合,最后得到对选用材料BK7的玻璃透镜在热压成型工艺中随着冷却速率逐渐降低而残余应力逐渐减小的结论。Weng等^[23]选用数值模

拟和双折射的方法测试了在不同孔径形状和工艺参数对注射成型的微透镜阵列中残余应力的影响,结果表明数值模拟和双折射实验中残余应力分布一致,孔径结构对残余应力有着显著影响,同时引入SSA因子来表示孔径形状来进一步定量表征与最大残余应力的关系。上述研究工作重点关注注塑成型中工艺参数对残余应力影响,研究对象的单元孔径尺寸都是在毫米级且通常把阵列器件视为平面板件进行残余应力分析。本文则对微米孔径的微透镜阵列残余应力分布状况进行了较为系统的测量研究,尝试寻找宏观/微观残余应力趋同规律,并指导优化加工工艺,具有一定研究价值。

本文通过宏观-微观尺度结合测量的方式分析研究了3种微透镜单元排布方式和两种器件厚度共计5种参数组合的微米尺度孔径透镜阵列中的残余应力分布状况,使用平面光弹仪测量微透镜阵列在平面正交偏振光场中残余应力的分布,使用偏光显微镜观测透镜阵列的微观结构并对其进行区域划分,测量得到各个区域的残余应力,并基于测量数据,研究了微透镜阵列宏观/微观尺度下残余应力趋同性,分析总结了基于微注塑成型工艺的微透镜阵列残余应力分布规律。

1 微透镜阵列制备及实验方案设计

本次实验中所使用的光学器件是在25 mm×22 mm×1 mm的基板上紧密排布的平凸型微透镜阵列,其阵列规模为174×158,有效面积为22 mm×20 mm,单元孔径在微米级。因为加工尺寸的达到了微米级,采用超精密切削加工方式直接加工微透镜阵列的方式会存在刀尖干涉效应,而对面型质量造成重大影响,故采用微切削工艺加工模具配合微注塑加工进行微透镜阵列的制备。本文的涉及的微透镜阵列中透镜单元数量约为27 000个,透镜深度约4 μm,在加工微透镜模具的过程中,选用铣削深度大于透镜深度的办法,保证每一个透镜单元面型的一致性。最后微切削得到微透镜阵列模具(图1),后注塑成型得到的1 mm厚度矩形孔径的微透镜阵列(图2(a)),1 mm/0.5 mm厚度的方形孔径微透镜阵列(图2(b)),1 mm/0.5 mm厚度的圆形孔径微透镜阵列(图2(c))共计5种微透镜阵列如表1所示。图2是不同类型的微透镜阵列在显微镜下的局部放大图。微透镜阵列器件在整体上看可视为一个光滑注塑薄基板件,为掌握器件整体的残余应力分布,实验先将5种阵列器件置入光弹仪,基于双折射原理对器件进行应力测量,得到器件残余应力二维分布场。之后,为进一步研究残余应力在微观尺度上的分布状况,将器件放入偏光显微镜的载物台上,考虑测量效率,将器件划分为左上、右上、中心、左下、右下5个区域,对5种器件的5个区域的残余应力进行测量,最

终得到残余应力在微米级透镜阵列中的分布和大小以及不同厚度、孔径类型与残余应力之间的关系。

表 1 微透镜阵列面型

Table 1 Micro lens array plane type

厚度/mm	面型
1	圆形相切
1	矩形
1	方形重叠
0.5	圆形相切
0.5	方形重叠



图 1 微透镜阵列模具加工

Fig. 1 Mold machining of microlens array

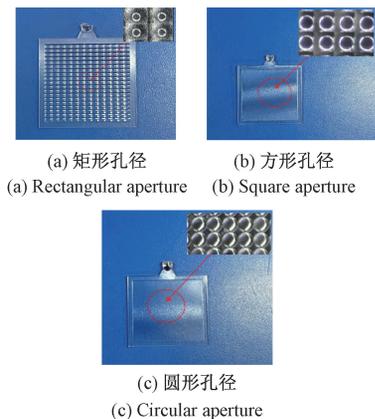


图 2 微透镜阵列面型

Fig. 2 Microlens array plane type

2 残余应力的测量

2.1 测量原理

对于多种非晶体透明材料,例如玻璃,赛璐璐,酚醛树脂,环氧树脂,聚碳酸酯塑料等,在内部存在应力的情况下,当光束通过时,这些非晶体的表面会产生跟双折射晶体一样的双折射效应。这种效应与其内部应力有关,当内部应力消失时,双折射效应也随之消失,故称这种现象为暂时双折射效应。当光垂直入射并通过内部存在应力的非晶体模型中的任意一点时,由于双折射效应,光波沿该点的主轴方向分解,此时该点的主应力和对应的主折射率有如下关系:

$$n_1 - n_0 = C_1 \sigma_1 + C_2 \sigma_2 \quad (1)$$

$$n_2 - n_0 = C_1 \sigma_2 + C_2 \sigma_1 \quad (2)$$

式中: n_0 为无应力时模型材料的折射率; n_1 为 σ_1 方向的折射率; n_2 为 σ_2 方向的折射率; C_1, C_2 是模型材料的应力-光学系数。

将两式相减,可得:

$$n_1 - n_2 = (C_1 - C_2)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (3)$$

已知当偏振光通过该点时产生的光程差 Δ 为:

$$\Delta = (n_1 - n_2)h \quad (4)$$

式中: h 为模型厚度,将式(4)代入式(3)中可得:

$$\Delta = Ch(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (5)$$

最后可基于式(5)进行器件的残余应力测量。

2.2 宏观残余应力的测量

通过光弹仪对 5 种平凸型平面微透镜阵列在平面正交偏振光场暗场下进行残余应力测量,实验中通过光源、起偏镜和检偏镜组成的平面偏振光场,因待测器件中存在的残余应力而产生的双折射现象,从而得到残余应力的分布情况。试验光源为白光光源,起偏镜和检偏镜的旋转轴保持垂直,将标准的对径受压圆盘放入光场中,观察到圆盘中心有着清晰的十字线,此时光场是正交平面偏振光场。正交平面偏振光经过阵列后得到等差线和等倾线的耦合图案,也就是阵列中出现黑白干涉条纹,表示阵列中存在残余应力。后用图像采集系统拍摄到不同阵列器件的残余应力分布图像。自主搭建的平面偏振光学系统如图 3 所示,测试不同的阵列器件可以通过精度为 0.001 N 的力学传感器保证无外力对测量结果产生影响,图像采集系统中镜头的光轴中心和起偏镜,检偏镜保持在同一条直线上。

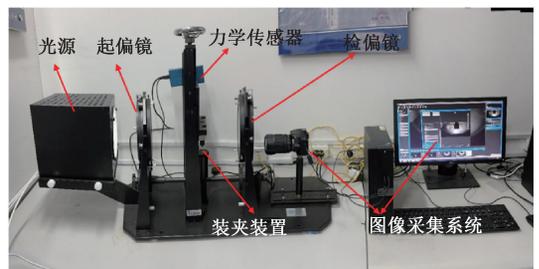


图 3 平面偏振光学系统

Fig. 3 Plane polarized optical system

光弹法测试原理如图 4 所示,测试双折射样品可以在不同的光源和不同的光场下获得等色线,等差线和等倾线。等差线是在单色光源下主应力差相等的干涉条纹,可以定量计算和分析,等色是在白色光源下由同一种颜色条纹组成的主应力差相同的等值线,反映了残余应力的分布状况。

2.3 微观残余应力的测量

本实验中对微透镜阵列残余应力的微观划分区测

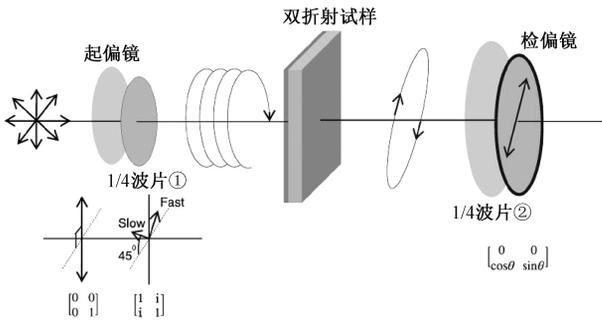


图4 光弹法原理

Fig. 4 Schematic diagram of photoelastic method

量,采用 OLYMPUS 公司的 BX53M 光学显微镜(图5)。其主要性能参数如下:放大倍率为 100 倍;检偏镜旋转角度精度为 0.1°;载物台旋转角度精度为 1°;单色光波长为 546.1 nm,光程差的测量精度为 0.3 nm。其中选用的补偿器型号为 U-CBE,刻度 1 最小度数为 10°,刻度 2 最小度数为 0.05°。残余应力的测量:将阵列器件的有效面积划分为 5 个待测区域,后放置待测器件于旋转载物台上,同时旋转载物台获得阵列的测量区域为最暗,此时残余应力的方向与起偏镜和检偏镜的偏振轴方向保持一致,光场为平面偏振暗场。旋转载物台+45°并固定载物台,旋转补偿器旋钮至刻度为 30°位置,插入偏光装置,并旋转补偿器旋钮,观察并确认阵列测量区域出现黑色干涉条纹,此时的度数记为 θ_1 ,反方向旋转补偿器按钮直至观察到阵列观测区域再次出现黑色干涉条纹记此时的读数为 θ_2 ,重复获得 5 组的 θ_1 和 θ_2 ,减小测量结果的误差,最后求其平均值 $\bar{\theta}_1$ 和 $\bar{\theta}_2$ 两个平均值分别反映了不同主方向的主应力。



图5 偏光显微镜

Fig. 5 Polarizing microscope

3 实验结果及数据分析

3.1 宏观残余应力分布情况

5 种微透镜阵列在平面偏振光学系统的测量结果,如图 6 所示。依次为方形重叠微透镜阵列(1 mm)、圆形

相切微透镜阵列(1 mm)、矩形微透镜阵列(1 mm)、方形重叠微透镜阵列(0.5 mm)、圆形相切微透镜阵列(0.5 mm)。其中阵列器件上出现的黑色干涉条纹是等倾线,表示该区域内的所有测量点的主应力方向一致,且区域内所有点的主应力差大小是相等的,白色区域是相位差相等的等值线,是主应力差大小相等的等值线。残余应力的总体分布情况:1 mm 厚度的圆形相切微透镜阵列,矩形微透镜阵列,方形重叠微透镜阵列分布情况相同,呈浇口向外的抛物线状。0.5 mm 厚度的方形重叠微透镜阵列和圆形相切微透镜阵列残余应力的分布相同,呈阵列末端向外的抛物线状。在面型相同的情况下,不同厚度的微透镜阵列残余应力分布则完全不同。1 mm 阵列的残余应力主要是集中于浇口附近,并从浇口中心处一直延伸到末端。0.5 mm 阵列的残余应力主要是集中于器件末端,由末端中心处一直延伸到浇口处。

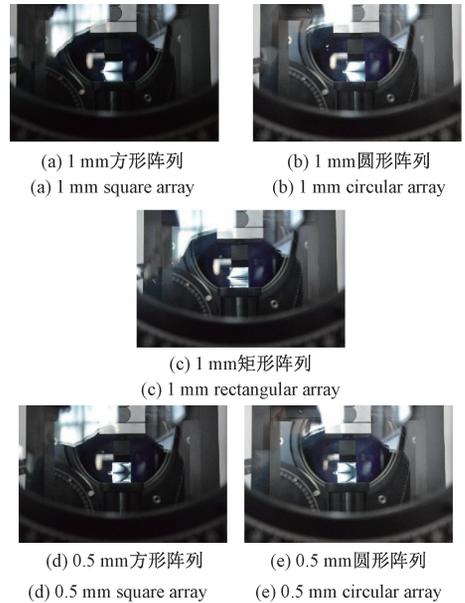


图6 光弹实验测量结果

Fig. 6 Photoelastic test results

3.2 微观残余应力分布数据分析

微透镜阵列的测量区域划分如图 7 所示,5 种微透镜阵列在偏光显微镜的光程差计算,由通过补偿器提供的换算表得到。可基于补偿器提供的式(6)进行相位差计算。

$$\theta = \frac{|\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_2|}{2} \quad (6)$$

试验对 5 种微透镜阵列 5 个区域的残余应力进行了测量。将各个待测区域通过偏光显微镜上补偿器在逆时针/顺时针的旋转得到 5 组 θ_1 和 θ_2 后计算平均值 $\bar{\theta}_1$ 和 $\bar{\theta}_2$,最后得到了反映透镜阵列各区域残余应力分布的柱

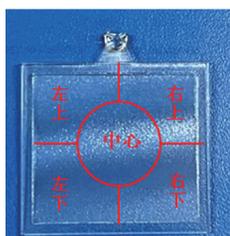
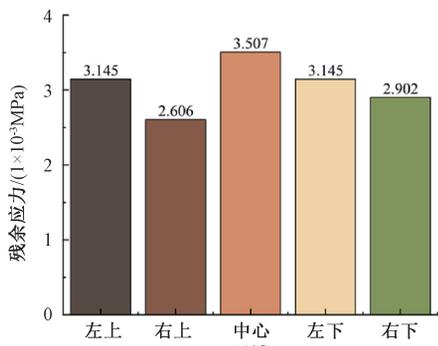


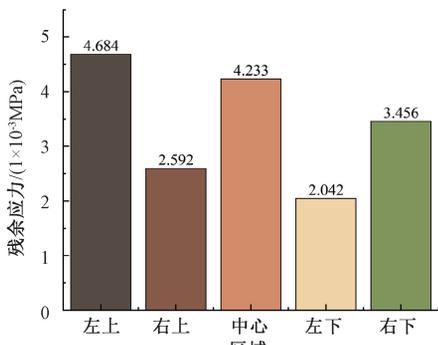
图 7 微透镜阵列观察区域

Fig. 7 Observation area of micro lens array

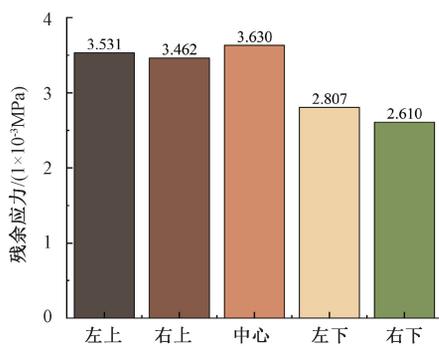
状图(图 8)。从图 8(a)中可以看出,1 mm 方形阵列中心区域残余应力较大,右上区域残余应力较小,总体残余应力分布较为均匀且各区域残余应力相差不大;1 mm 圆形阵列图 8(b)左上区域残余应力最大,中心区域残余应力次之,左下区域残余应力最小;总体呈现以阵列中心为对称轴左边区域的残余应力大于右边区域;1 mm 矩形从图 8(c)中可以看出,左上、右上和中心区域残余应力较大,左下和右下区域残余应力较小,总体呈现中心和上半部分区域应力大于下半部分区域;对 0.5 mm 方形图 8(d)和 0.5 mm 圆形图 8(e)中心区域残余应力最大,总体上中心区域残余应力和其它四个区域残余应力相差较大,0.5 mm 圆形阵列各个区域残余应力大于 0.5 mm 方形阵列。随着厚度从 1 mm 减小至 0.5 mm 器件的残余应力逐渐增大;不同的孔径形状对残余应力也有着一定的影响。



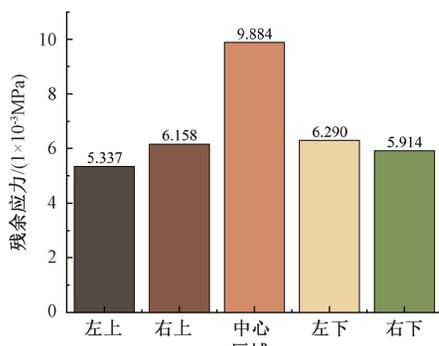
(a) 1 mm 方形
(a) 1 mm square



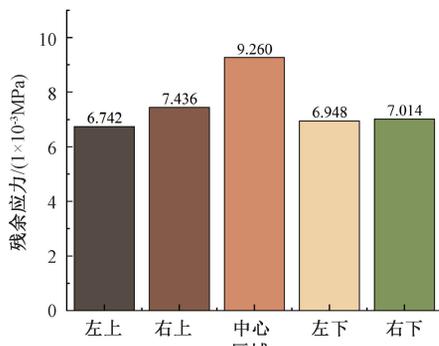
(b) 1 mm 圆形
(b) 1 mm circular



(c) 1 mm 矩形
(c) 1 mm rectangular



(d) 0.5 mm 方形
(d) 0.5 mm square



(e) 0.5 mm 圆形
(e) 0.5 mm square

图 8 微透镜阵列各个区域残余应力柱状图

Fig. 8 Histogram of residual stress in each region of microlens array

如图 9 所示,通过在 1 mm 厚度下矩形阵列、方形阵列、圆形阵列微观各个区域的残余应力对比分析,得到在相同的有效面积下不同的单元面型会对残余应力的大小影响,其中矩形阵列各个区域之间的残余应力的差异大于方形和圆形阵列,圆形阵列和方形阵列各个区域残余应力表现出先减小后增大最后减小的趋势;0.5 mm 厚度下圆形阵列和方形阵列都表现出先增大到中心区域为最大值后逐渐减小的趋势;在厚度不同的方形阵列和圆形阵列下,器件厚度为 0.5 mm 各区域的残余应力较大于厚度 1 mm 的器件,各个区域之间残余应力相差较大。从总

体上看厚度对残余应力大小的影响大于面型结构。

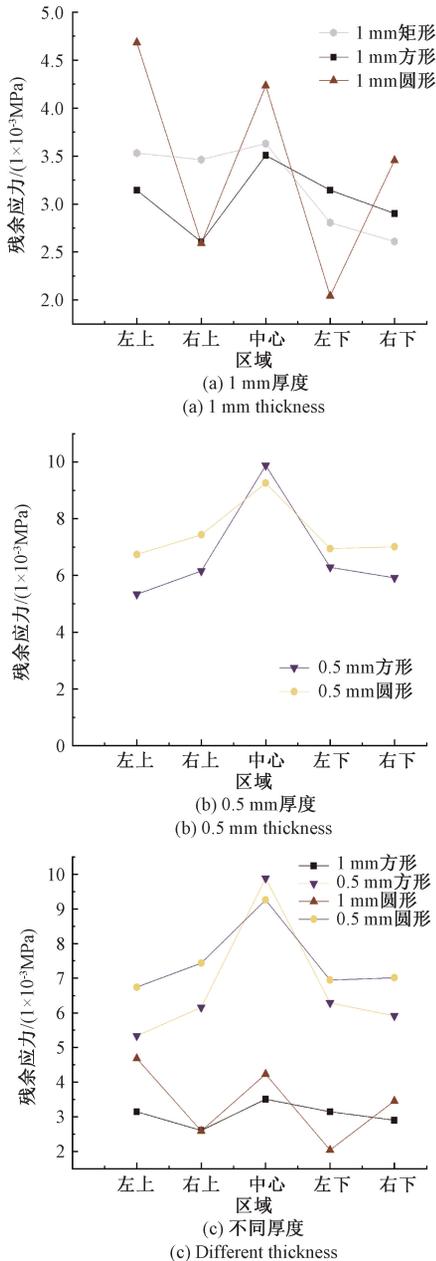


图9 不同厚度和不同面型下残余应力
Fig. 9 Residual stress at different thicknesses and different face shapes

3.3 宏观/微观残余应力综合分析

通过比对同类微透镜阵列宏观/微观测结果可以发现,微透镜单元的残余应力大小与其所在区域的宏观残余应力分布呈现较为明显的正相关,符合加工经验和研究直觉。以1 mm 矩形排布阵列为例,其左上/右上区域对应光弹仪测量图片中,浇口附近的上/下两区域,从光弹仪图像中可见这两部分区域残余应力(差值)呈对称分布,与微观测结果柱状图一致(3.531/3.462)。而

左下/右下区域与光弹仪图片右侧上/下区域对应,其宏观残余应力(差值)亦成对称分布,与柱状图中(2.807/2.610)对应。0.5 mm(方形/圆形)阵列中心区域在光弹实验中呈现中心区域残余应力集中比较明显对应柱状图中的(9.884/9.260)从上述比对分析中可以看出,微透镜阵列宏观/微观区域的残余应力分布呈现较强的互相关性,在两个尺度进行测量比对可进一步提升观测准确度,更为精准的掌握残余应力分布规律。

4 结论

通过对微米级器件在正交平面偏振暗场下残余应力分布的观测情况:黑色条纹呈直线状的是由于熔体在微注塑过程中流动不均匀所形成的,呈抛物线状的黑色条纹是在冷却过程中因温度变化不均匀所产生的。不同厚度的残余应力形成机理是相同的,但残余应力分布则是完全不同。在面型相同的情况下,厚度对于残余应力的分布有着重要的影响。厚度为1 mm,矩形阵列的存在残余应力所占区域最小,圆形阵列次之。最后是方形阵列。厚度为0.5 mm的透镜阵列,方形阵列所占的残余应力区域大于圆形阵列。但面型结构对于残余应力分布相对于厚度来说影响较小。对阵列器件中残余应力的测量结果中,0.5 mm 相较于1 mm 厚的阵列器件,残余应力值表现出逐渐增加的现象,0.5 mm 的方形阵列中心区域残余应力由0.003 63 MPa 增加至0.009 26 MPa。根据面型不同,方形孔径的各个区域的残余应力值小于圆形孔径各个区域应力值,最大的残余应力0.003 63 MPa 增加到了0.004 26 MPa。其中,在微透镜单元尺度不同,矩形孔径各个区域微透镜单元各个区域残余应力要小于方形孔径,圆形孔径微透镜阵列单元,最大的残余应力由0.003 507 MPa 增加至0.004 23 MPa。本文涉及的采用微铣削/微注塑工艺制造的微透镜阵列,其残余应力分布较为均匀,透镜单元一致性可以得到保证,器件整体光学性能较好,具有较高的可靠性。因此,采用微注塑工艺制造的单元孔径尺寸在微米级的微透镜阵列器件,仍有残余应力的存在,对器件的光学性能有着重要影响。各个阵列残余应力的大小相差不大,考虑到器件整体尺寸较小,由残余应力分布不均匀,引起的翘曲变形和断裂失效的可能性较小。以上测量结果表明光弹实验法和偏光显微镜测量法可以有效的测量微米级透镜阵列中残余应力的分布和大小,对后续微米级透镜阵列的研究提供了新的思路。

参考文献

[1] PANG K, FANG F, SONG L, et al. Bionic compound eye for 3D motion detection using an optical freeform surface[J]. Journal of the Optical Society of America B,

- 2017,34(5): B28-B35.
- [2] YANG X, GENG C, LI X Y, et al. Performance comparison of quasi-optical phased arrays using micro lens array with different structures [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 118:103861.
- [3] 董霏,侯北平,刘宇,等. 基于机器视觉的线缆导体质量检测研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(6): 144-153.
- DONG F, HOU B P, LIU Y, et al. Research on quality inspection of cable conductor based on machine vision[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(6): 144-153.
- [4] PANG K, SONG L, LI X Z, et al. Large-depth-of-field imaging system using a square aperture overlapped micro-lens array [J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(6): 063101.
- [5] LIN C M, CHEN W C. Optimization of injection-molding processing conditions for plastic double-convex Fresnel lens using grey-based Taguchi method [J]. *Microsystem Technologies-Micro-and Nanosystems-Information Storage and Processing Systems*, 2020, 26(8): 2575-2588.
- [6] KIRCHBERG S, CHEN L, XIE L, et al. Replication of precise polymeric microlens arrays combining ultra-precision diamond ball-end milling and micro injection molding [J]. *Microsystem Technologies*, 2012, 18(4): 459-465.
- [7] 周天丰,解加庆,梁志强,等. 光学微透镜阵列模压成形研究进展与展望 [J]. *中国光学*. 2017, 10(5): 603-618.
- ZHOU T F, XIE J Q, LIANG ZH Q, et al. Advances and prospects of molding for optical micro lens array [J]. *Chinese Journal of Optics*. 2017, 10(5): 603-618.
- [8] 孟繁斐,步敬. 集成成像系统中高填充率微透镜阵列的设计与加工 [J]. *光学精密工程*. 2017, 25(8): 2130-2138.
- MENG F F, BU J. Design and fabrication for micro-lens array with high fill factor in integral imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2130-2138.
- [9] 刘鑫,张满,史立芳,等. 一种大 F 数微透镜阵列的制备方法 [J]. *光子学报*, 2017, 46(2): 32-37.
- LIU X, ZHANG M, SHI L F, et al. Fabrication method for the micro lens array of high F-number [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(2): 32-37.
- [10] 郭弘扬,杜升平. 驱动电压对向列型液晶调制相位的影响 [J]. *国外电子测量技术*, 2017, 36(12): 28-31.
- GUO H Y, DU SH P. Influence of driving voltage on phase modulation of nematic liquid crystal [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2017, 36(12): 28-31.
- [11] 何改云,黄鑫,郭龙真. 自由曲面轮廓度误差评定及不确定度分析 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(3): 395-401.
- HE G Y, HUANG X, GUO L ZH. Evaluation of free-form surface profile error and analysis of uncertainty [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(3): 395-401.
- [12] 龚灯,韩刚. 基于磁记忆方法的管道应力检测设备的开发 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(2): 94-100.
- GONG D, HAN G. Development of pipeline stress detection equipment based on magnetic memory method [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(2): 94-100.
- [13] 王启超,张维光,任永平. 基于全景相机的 3D 坐标测量方法 [J]. *电子测量技术*, 2017, 40(12): 203-208.
- WANG Q CH, ZHANG W G, REN Y P. 3D coordinate measurement method based on panoramic camera [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2017, 40(12): 203-208.
- [14] DESHMUKH S S, GOSWAMI A. Micro lens array through induction-aided hot embossing: fabrication, optimization and characterization [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2022, 37(13): 1540-1554.
- [15] GUEVARA-MORALES A, FIGUEROA-LÓPEZ U. Residual stresses in injection molded products [J]. *Journal of Materials Science*, 2014, 49(13): 4399-4415.
- [16] CHEN J, PENG Y, ZHAO S. Comparison between grating rosette and strain gage rosette in hole-drilling combined systems [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2009, 47(9): 935-940.
- [17] 毛向向,王红军. 薄壁零件复杂光照情况下的轮廓特征识别 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(3): 137-143.
- MAO X X, WANG H J. Improved retinex and edge detection fusion of thin-walled complex part contour recognition algorithm [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(3): 137-143.
- [18] 王楠,罗岚,刘勇,等. 金属构件残余应力测量技术进展 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(10): 2508-2517.
- WANG N, LUO L, LIU Y, et al. Research progress on stress measurement technology for metal components [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(10): 2508-2517.
- [19] 孙磊磊,蒋炳炎,陈磊,等. 微透镜阵列注射压缩成型

- 的残余应力[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(10): 2635-2640.
- SUN L L, JIANG B Y, CHEN L, et al. Residual force of microlens array by injection compression molding [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(10): 2635-2640.
- [20] 蒋丰泽, 刘义伦, 陈磊, 等. 工艺参数对注射压缩成型微透镜阵列基板双折射率的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(8): 2610-2616.
- JIANG F Z, LIU Y L, CHEN L, et al. Effects of compression parameters on birefringence of injection compression molded microlens array substrate [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(8): 2610-2616.
- [21] 邱庆军, 蒋炳炎, 陈磊, 等. 薄壁塑件注射压缩成型热残余应力仿真研究[J]. 塑料工业, 2012, 40(7): 35-39.
- QIU Q J, JIANG B Y, CHEN L, et al. Study on thermal residual stress of injection compression molded thin-walled plastic part by simulation [J]. China Plastics Industry, 2012, 40(7): 35-39.
- [22] TAO B, HE P, SHEN L G, et al. Quantitatively measurement and analysis of residual stresses in molded aspherical glass lenses [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(9-12): 1167-1174.

- [23] WENG C, LEE W B, TO S. A study of the relevant effects on the maximum residual stress in the precision injection moulding of microlens arrays [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20(3): 035033.

作者简介



许全忠, 2020年于太原学院获得学士学位, 现为天津商业大学硕士研究生, 主要研究方向为机械强度分析及智能检测。

E-mail: xuqz403@163.com

Xu Quanzhong received his B. Sc. degree from Taiyuan University in 2020. Now he is a M. Sc. candidate at Tianjin University of Commerce. His main research interests include mechanical strength analysis and intelligent testing.



陈诚(通信作者), 分别在2007年和2010年于天津大学获得硕士学位和博士学位, 现为天津商业大学教授, 主要研究方向为精密测试技术及智能传感器。

E-mail: chencheng@tjcu. du. cn

Chen Cheng (Corresponding author) received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Tianjin University in 2007 and 2010, respectively. He is now a professor at Tianjin University of Commerce. His main research interests include precision measurement technology and intelligent sensors.