文章编号　2095-1531(2017)05-0603-16

光学微透镜阵列模压成形研究进展与展望

周天丰,解加庆,梁志强*,刘　欣,刘晓华,王西彬
(北京理工大学 机械与车辆学院 先进加工技术国防重点学科实验室,北京 100081)

摘要:光学微透镜阵列在光学系统中的应用广泛,需求量大,而玻璃模压成形技术是最高效的微透镜阵列量产加工方法,具有精度高,一致性好,生产成本低等特点,有重要的应用研究价值。本文介绍了光学微透镜阵列的设计原理,模具制造技术,模压成形技术及相应检测技术;重点介绍了微透镜阵列模压成形试验与有限元仿真研究的最新进展;最后对微透镜模压成形发展前景进行了展望,包括微透镜阵列模压材料,模具表面镀层技术及超声复合加工技术在微透镜阵列模压成形中的应用等。

关　键　词:微透镜阵列;玻璃模压成形;低熔点光学玻璃;有限元仿真;表面镀层技术
中图分类号:TP394.1; TH161.1　　**文献标识码:**A　　doi:10.3788/CO.20171005.0603

Advances and prospects of molding for optical microlens array

ZHOU Tian-feng, XIE Jia-qing, LIANG Zhi-qiang*, LIU Xin, LIU Xiao-hua, WANG Xi-bin
(*Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: liangzhiqiang@bit.edu.cn*

Abstract: The optical microlens array is widely used in the optical system with high demand. The glass molding technology is the most efficient methods of mass production and processing of microlens array with characteristics of high precision, good consistency and low production cost, which has important application and research value. In this paper, the design principle of optical microlens array, as well as mold manufacturing technology, glass molding technology and the corresponding detection technology is introduced. The latest development of microlens array molding test and FEM simulation are mainly discussed. The development of microlens molding, including the material for microlens array molding, the mold surface coating technology, and the application of ultrasonic composite processing technology in the microlens array molding is prospected at the end of this paper.

Key words: microlens array; glass molding; low-melting optical glass; finite element simulation; surface coating technology

---

收稿日期:2017-05-11;**修订日期:**2017-08-13
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(No. 2015CB059900);国家自然科学基金资助项目(No. 51375050);霍英东教育基金青年教师基金资助项目(No. 151052)
Supported by National Program on Key Basic Research Projects of China(No. 2015CB059900); National Natural Science Foundation of China(No. 51375050); Fok Ying-Tong Education Foundation for Young Teachers in the Higher Education Institutions of China(No. 151052)

1 引 言

光学微透镜阵列是指一定数量微纳尺度的球面或自由曲面透镜的排列组合,因其特殊的几何特征,而具有多种光学功能,可在红外、可见光、紫外(UV)/极紫外(EUV)乃至X射线波段对光波的物理特性进行调控和利用,以实现传统光学元件难以完成的功能,在现代光学技术发展中具有重要应用价值。微透镜阵列的周期尺寸一般为500 nm~50 μm,根据其排布不同,又可分为邻接式微透镜阵列和分布式微透镜阵列。目前微透镜阵列在光学系统中主要应用其反射、衍射、三维成像及对光线的匀化功能。微透镜阵列的集成成像系统具有优良的三维图像显示能力,应用于视差型三维显示系统有利于使还原光场接近于真实物光场[1-4];使用微透镜阵列的投影式三维显示屏可以实现高分辨大面积的真彩色三维显示效果,是目前更接近实用化的三维显示手段[5]。基于微透镜阵列的自由移动视差式立体显示数字对焦光场相机利用微透镜阵列进行孔径分割实现光场获取,可以获得成像目标辐射的四维光场[6-8];将二维微透镜阵列应用于含目镜系统的显微镜,利用其对光束的匀化效果,可以有效减少使用显微镜产生的视觉疲劳;半导体激光器由于自身波导结构的不对称性导致光强分布不均匀而限制了其应用,基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈匀化系统,可以实现对半导体激光光束的整形以获得匀化光斑[9-15];微透镜阵列应用于光场成像系统,可以同时记录光线的强度和方向信息,达到实现拍摄快速变化的物体的目的[16-19];将微透镜阵列引入红外探测系统,利用微透镜阵列的扩束原理,可以实现多目标红外辐射监控[20-21]。有机电致发光器件(Organic electroluminescence device, OELD)作为新一代照明和显示技术,其外量子提取效率较低一直是制约其应用的最重要因素,微透镜阵列对OELD的外量子提取效率及辐射角度都有提高效果,从而实现对OELD出光的定向散射,提高了OELD的实际应用[22-24]。此外,复眼型微透镜阵列系统由于具备大视场、高敏感性、高灵敏度等特性,在测量,运动跟踪以及三维物体精确导航具备独特优势,近年来得到了广泛关注[25-26]。

传统微透镜阵列的制造方法主要以单点金刚石切削加工、光刻技术、LIGA技术、"三束"(电子束、离子束、激光束)技术为主。单点金刚石切削具有较高的加工精度,但是由于玻璃材料在常温下属于脆性材料,因此一次切削进给量非常小,且加工一致性难以保证,不适合批量生产;光刻技术、LIGA技术、"三束"加工技术等光学微纳阵列加工技术虽然能够完成特征尺寸很小、表面质量很高的微纳结构加工,但该工艺受到生产效率及工艺稳定性的限制,不能很好的满足行业需求[27-35]。光学玻璃模压成形技术应用于微透镜阵列加工在近年来逐渐得到了重视,该技术是指在高温下对模具施加一定的压力从而将模具表面的微透镜阵列形状复制到受热软化的玻璃表面上,再经退火冷却固化,得到理想的玻璃微透镜阵列。该技术可以实现玻璃微透镜阵列的大批量、高效率制造,由于加工过程中不涉及材料的去除,因此能够大幅度减少原材料消耗,降低制造成本,被认为是光学微透镜阵列制造最有效方法之一,具有极高的研究与应用价值[36-40]。

2 微透镜阵列设计与模压成形技术

2.1 微透镜阵列设计

微透镜阵列,即形貌上为小尺度阵列结构,口径范围在几微米至几百微米之间。根据透镜的功能和所依据光学原理不同,其理论设计方法可分为两种。折射微透镜的光学原理和设计原理分别是基于光的折射和几何光学理论,衍射微透镜则是一种纯相位衍射光学元件,当其振幅透过率为1时(即不考虑其透射面的反射损失和材料内部的吸收损失),它是基于光的衍射原理,因此其设计则是依据衍射光学理论,目前标量衍射理论应用最为广泛[41-44]。

但随着微型元件制作工艺的不断创新,特征尺寸更微细的二元光学器件制造有重大突破性进展,器件的特征尺寸可以小至波长甚至亚波长量级,浮雕深度可达几个波长量级。此时,光波的偏振性和不同偏振光之间的相互作用对光的衍射结

果影响很大。这种情况下,基于标量衍射理论对衍射光学元件进行设计,结果将不再精确,而必须应用严格的矢量衍射理论及其设计方法。从数理角度来看,严格的矢量衍射理论的出发点是光为矢量波,数学基础则是电磁场的麦克斯韦方程组及其边界条件。理论上讲,麦克斯韦方程组可精确求解任意的衍射方程,然而在许多实际应用中,只能用数值方法求解麦克斯韦方程组。目前,矢量衍射理论常用的几种分析方法有:积分法、微分法、模态法和耦合波法[45-47]。

上述方法虽然精确但却繁琐,计算机软件在光学计算的应用可以大幅提高设计效率。Zemax 是目前使用最广泛的光学设计软件之一,它能够实现实际光学系统的设计概念、优化、分析、公差以及报表的整合,也可实现全功能的光学设计分析,直接完成对微透镜阵列的设计和模拟,并可对其进行优化,得到一个较好的设计结果。具有直观、功能强大、灵活、快速、容易使用等优点[48]。

在微透镜阵列的设计中,在全面考虑折射和衍射光学元件的色散、光学系统中的光能损失(包括透射面的反射损失和材料内部的吸收损失)的基础上,需遵循折射微透镜的一般设计方法和衍射光学元件的相应设计方法,有效利用多种功能齐全的仿真软件对所需特定功能的微透镜阵列进行设计,利用微透镜阵列成像形成多种新功能,促进光学仪器和元件向集成化、多功能化发展。图 1 展示了一组经过设计的 8×8 自由曲面透镜阵列,其通过改变透镜曲面角度,在保持原有形状尺寸的基础上可达到 ±23.5°的视场。

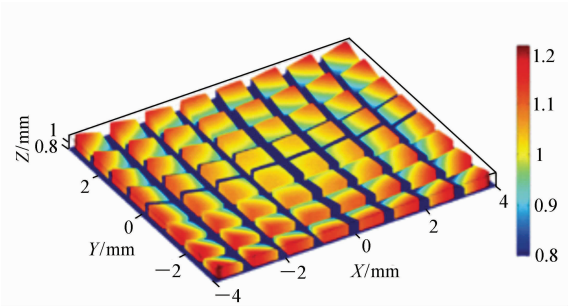

图 1　一组 8×8 自由曲面透镜阵列的表面轮廓图[49]

Fig. 1　Surface profiles of the 8×8 freeform microlens array[49]

2.2　模压成形设备

玻璃模压成形装置最早被用于球面、非球面透镜的生产加工,商业化的模压成形设备主要有多缸串联模压成形机及单缸模压机[50-52]。

图 2(a)为日本 SYS 机械生产的 PFLF7-60A 多缸串联模压成形机,其原理图见图 2(b)所示,设备包含控制柜与模压机主体。模压机主体包含加热、加压及自动输送装置,玻璃或塑料预形体在模压机主体内部经过加热保温、高温加压、减压退火以及冷却脱模,被加工成所需要的形状。模具通过模压腔内的电加热棒加热到预设温度,加工室内通高纯度氮气防止被加工件及模具发生氧化[53-55]。该模压成形设备支持中小口径的微透镜阵列的大批量生产,成形一致性较好,模具加工容易。此外,改进型的模压成形机使用红外线灯加热,进一步提高了设备的安全性。

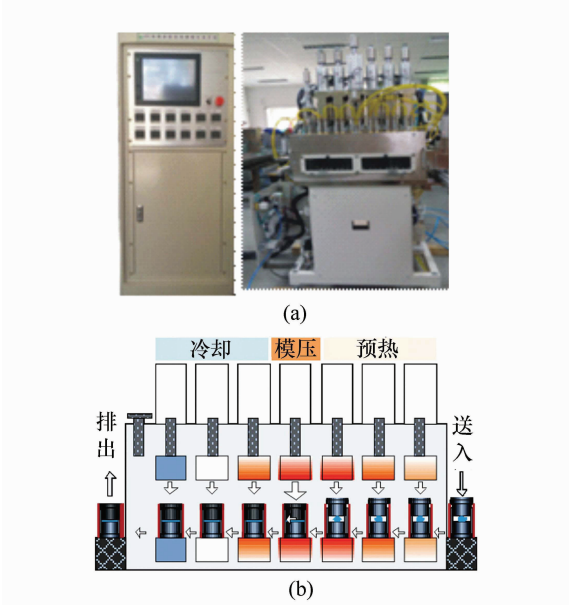

图 2　(a) SYS PFLF7-60A 玻璃模压成形机;(b)设备原理图

Fig. 2　(a) Photograph of the SYS PFLF7-60A glass molding machine;(b) Schematic diagram of the machine

2.3　低熔点光学玻璃

玻璃材料主要成分是二氧化硅,该材料在常温下是脆性材料,高温下则表现出粘弹性的特征,随着温度的提高,材料的弹性模量呈四五个数量级的降低[56]。当玻璃从室温加热到高温时,依据其膨胀系数的变化特点,可以将温度细分为应变

点(StP)、退火点(AP)、转变点(T_g)、屈服点(A_t)、软化点(SP)。作为模压成形用光学玻璃,需要具备较低的玻璃转变点(T_g)温度,这样不只可以延长模具成形所用的模具寿命,还可缩短生产周期,目前住田光学生产的K-PG325玻璃其转变点温度可以达到288 ℃,被认为是目前有报道的转变点温度最低的商业化模压用光学玻璃。此外,较低的线性膨胀系数可以提高微透镜阵列的模压成形精度,降低次品率,表1为两种典型模压用低熔点光学玻璃的材料物理属性。

表1 模压用光学玻璃热机械性能[57-58]

Tab.1 Thermo-mechanical properties of glass

属性	L-BAL35(OharaInc)	K-PG325(SUMITA Optical Glass, Inc)
转变温度 T_g/℃	527	288
屈服温度 A_t/℃	567	317
软化温度 SP/℃	619	325
热膨胀系数 α($\times10^{-6}$/℃)	6.6(-30~70 ℃)	14.3(-30~70 ℃)
	8.1(100~300 ℃)	16.5(50~200 ℃)
传导率 k(W/(m·K))	1.126	0.748
弹性模量 E($\times10^9$ N/m^2)	100.8	64.2
泊松比 v	0.247	0.265

在转换温度(T_g)和软化温度(SP)的温度区间内,玻璃主要表现出粘弹性特征,即兼具固体弹性和流体粘性的双重特性[59]。在施加应力时,主要出现瞬时弹性变形、迟滞弹性变形和线性粘性变形响应。弹性变形可视为瞬态响应,应力应变满足胡克定律,而粘性流动响应则是时间的函数。

工程上的粘弹性力学模型常见的有麦克斯韦模型(Maxwell model)、开尔文模型(Kelvin model)、伯格斯模型(Burgers model)及其相应的广义模型[60]。一般认为使用广义Maxwell模型描述模压过程中玻璃在高温下的粘弹性变形特性更为合适,图3是构建的4个弹簧和粘壶对(单元)的广义Maxwell模型。其中,G_∞、G_i和η_i分别是各单元的弹性模量和粘度。

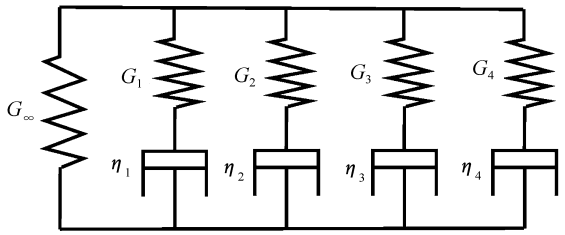

图3 广义Maxwell本构模型

Fig.3 Generalized Maxwell constitutive model

与时间相关的应力应变响应可以用下式描述:

$$\sigma = \int_0^t 2G(t-\tau)\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}\tau}\mathrm{d}\tau , \tag{1}$$

式中,t为当前时间,τ为过去的时间,$G(t-\tau)$可以用Prony级数来描述:

$$G(t-\tau) = G_0[\alpha_\infty + \sum_{i=1}^{n}\alpha_i\exp(-\frac{t}{\tau_i})] , \tag{2}$$

式中,τ_i为松弛时间,α_i为权重因子,n_G为广义Maxwell模型单元个数G_0为单元初始模量。

此外,在整个模压过程中,还要考虑高温玻璃的粘弹性时-温等效力学现象,即延长松弛时间或升高温度对分子运动的作用是等效的,即对玻璃材料的粘弹性力学行为是等效的[61]。不同温度下的位移因子α_T值常用WLF经验方程(Williams-Landel-Ferry)计算:

$$\log[A(T)] = -\frac{G_1(T-T_0)}{G_2+(T-T_0)}, \tag{3}$$

式中,G_1和G_2是参考温度,T_0处的材料常数。时温转换假说的最大实用意义在于有了这些关系可以用改变温度的方法大大扩展时间t或频率ω的范围,使我们有可能用一种实验方法来得到反映高聚物力学性能全貌的整个时间谱(频率谱),即可以把各个不同温度下测得的数据转换成某一参考温度的,包括许多时间量级的单根曲线组合曲

线,从而计算出比试验能测定的时间(频率)范围大得多的松弛时间分布。应用此模型不仅可以预测材料的粘弹性属性,还可以引入有限元仿真来对模压工艺过程进行分析[62-63]。

2.4　模具材料

在微透镜阵列的模压成形中,模具的制造是一个重要的课题。微透镜阵列模压用的模具材料需要具备以下特征:(1)在高温下保持高的硬度和强度,热膨胀系数尽量小,化学性质稳定,高温不易氧化;(2)材料一致性好,内部无瑕疵,能够通过加工达到光学级表面要求;(3)不与玻璃材料发生反应及粘接等现象[64-65]。传统硅和镍材料的模具由于耐热性差,只能用于模压温度较低的塑料透镜的加工,无法作为玻璃微透镜阵列的模具。碳化硅(SiC)和碳化钨(WC)是目前公认的两种适合玻璃模压成形的应用最为广泛的模具材料。碳化硅(SiC)材料是硅和碳的结晶化合物,是除了碳化硼外人工合成的最硬的材料之一,其莫氏硬度达到 9,仅次于金刚石。碳化硅材料高的热导率、高的高温强度,低热膨胀系数及热稳定性,使其成为微透镜阵列模具的良好选择。碳化钨(WC)是一种由钨和碳组成的化合物,为黑色六方晶体,有金属光泽,硬度与金刚石相近,为电、热的良好导体。碳化钨粉应用于硬质合金生产材料,并大量用作高速切削车刀、窑炉结构材料、喷气发动机部件、金属陶瓷材料、电阻发热元件等,表 2 是某型号的碳化钨材料的物理性能参数[66-68]。尽管碳化硅(SiC)和碳化钨(WC)材料的热物理性能可以满足微透镜阵列模具的要求,但是其高的硬度也为单点金刚石加工带来了困难,此外,由于两种材料中都存在碳原子,容易与金刚石刀具中的碳原子发生亲和反应,造成切削过程中金刚石刀具磨损严重,在不允许换刀的前提下难以完成大面积微纳结构加工,因此,有必要开发低硬度且更适合微透镜阵列模具的材料。

表 2　碳化钨材料的物理参数

Tab. 2　Properties of Tungsten carbide

化学式	WC
摩尔质量/(g · mol^{-1})	195.85
外观	Grey-black lustrous solid
密度/(g · cm^3)	15.6
熔点/℃	2 785 ~ 2 830
沸点/℃(at 0.101 3 MPa)	6 000

磷化镍 Ni-P 材料,硬度可以达到 500 ~ 600 HV,虽然不及碳化钨、碳化硅等超硬材料,但基本上满足玻璃模压成形的硬度要求;而且磷化镍 Ni-P 具有相对较好的切削性能,更适合单点金刚石切削,可作为玻璃模压成形模具的理想材料,但磷化镍 Ni-P 材料目前还不能成块制备。无电解磷化镍 Ni-P,即化学镀镍,主要通过磷酸镍还原法将析出的磷化镍 Ni-P 沉积到基体材料表面上。析出的磷化镍 Ni-P,包含 NiP、Ni3P、Ni5P2、Ni12P5、NiP2、Ni5P4、NiP2、NiP3 等多种相态,具有更加优越的均匀度、光洁度和致密性;而且磷化镍 Ni-P 对镀层的基材材料没有苛刻的要求,与铁、钢、超硬合金和钛合金都有良好的结合能力,镀层厚度可达 100 μm 以上[65]。图 4 为北京理工大学先进加工实验室在耐热不锈钢基材上通过化学镀合成的 Ni-P 镀层断面形貌图。

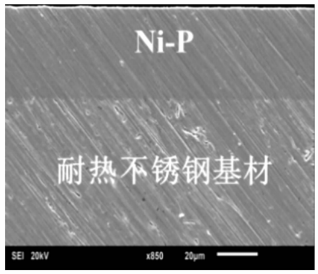

图 4　磷化镍 Ni-P 镀层断面形貌图

Fig. 4　Section topography of nickel phosphide coating

目前微透镜阵列加工技术主要有单点金刚石切削、单晶金刚石铣削、精密磨削及复合加工技术等,美国由于在核工业中的迫切需求,从 20 世纪 50 年代后期开始进行超精密加工机床方面的研究,在超精密加工领域一直处于引领地位,代表性企业有 Precitech、Moore 以及劳伦斯 · 利弗莫尔国家实验室(Livermore LLNL)。与美国不同,日本的超精密加工技术从民用工业开始发展起来,尽管起步比美国晚 20 年,但是由于从美国得到大量先进超精密加工技术,从而走出了一条快捷的发展道路。目前,国内也有多家单位开展超精密设备的研发及制造,并取得了突出的进展。

3 微透镜阵列模压成形试验与仿真

3.1 模压成形过程

以 SYS 模压机模压成形过程为例，成形模具包括上模、下模和内外套筒，通过调节套筒高度可以控制模具压下的距离。完整的模压成形过程分为 4 个阶段：加热保温、高温加压、减压退火以及冷却脱模阶段，如图 5 所示。(1)将玻璃预形体放入模具模芯中，通过自动进给装置运至模压机成形室进行加热，成形室通入氮气防止玻璃和模具的氧化；(2)玻璃预形体在成形室内被加热到高于软化温度 30～40 ℃时，上下模具闭合，玻璃预形体被压缩，保持一定时间使微纳结构填充完全；(3)在上模上继续维持一个较小的载荷，缓慢降低模具温度至 200 ℃上下；(4)模具退出成形室，冷却至室温后将玻璃成形件取出。图 6 为 A. Y. Yi 加工出的玻璃微透镜阵列[69]。

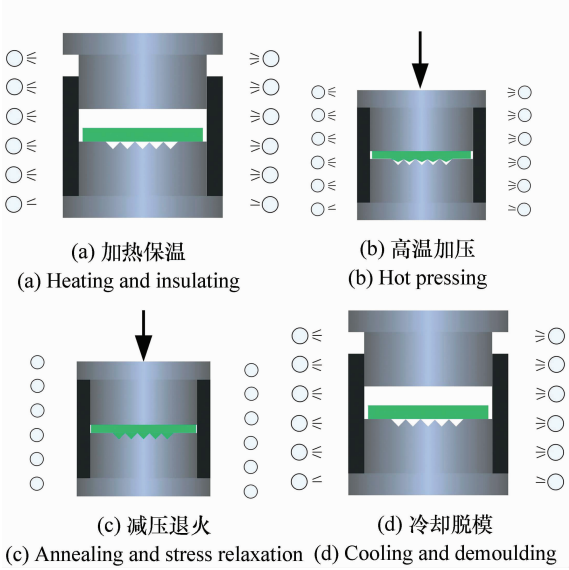

图 5 微透镜阵列模压成形过程

Fig. 5 Glass molding process of microlens array

3.2 成形品检测

对模压得到的微透镜阵列的检测主要分为接触式和非接触式测量。接触式测量是指测量探针从被测物表面划过，电脑通过精密传感器记录下探针所走的轨迹，此轨迹即为被测表面的轮廓形状。非接触式测量是以光电、电磁等技术为基础，在不接触被测物表面的情况下，得到物体表面参数和信息。

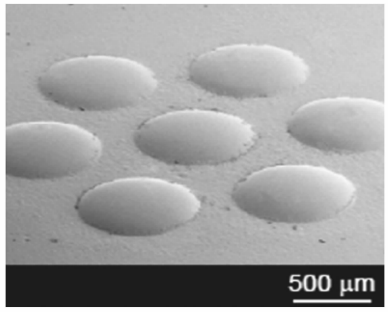

图 6 玻璃微透镜阵列 SEM 图

Fig. 6 SEM photograph of microlens array

典型的接触式测量设备有美国 Taylor Hobson 产的 Talysurf(T/H)轮廓仪，图 7(a)所示，以及日本 Panasonic 产的 UA3P 系列高精度三维立体测量仪，见图 7(b)[70-72]。

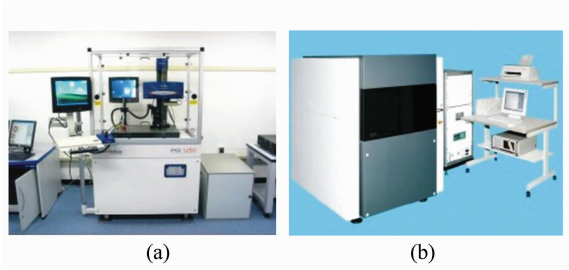

图 7 (a)Talysurf (T/H)轮廓仪；(b)Panasonic UA3P 三维立体测量仪

Fig. 7 (a) Talysurf (T/H) profiler; (b) Panasonic UA3P three dimensional measuring instrument

接触式显微镜在测量时直接接触物体表面进行测量，因而不受物体表面颜色、反射性和曲率等影响，非常适合光学材料的测量，但是其缺点也很明显，主要包括无法测量零件上小于探头直径的小孔，测量探头与工件接触，容易产生磨损，因此需要经常校准，接触式测量需要逐点测量，测量速度慢，探头出发机构的延迟导致的动态误差等[73-75]。

非接触式测量按照原理可分为光学显微镜、干涉式显微镜及电子显微镜。光学显微镜利用表面为曲面的玻璃或其他透明材料制成的光学透镜可以使物体放大成像的原理，对被测物体进行放大观察，图 8(a)是奥林巴斯 LEXT OLS4100 共聚焦显微镜[76]。白光干涉仪是利用待测物体表面

反射光线与参考反射光产生干涉作用测量待测物体,图 8(b)是泰勒霍普森 Talysurf CCI 白光干涉仪。扫描电子显微镜(SEM)最初主要应用于细胞生物学研究领域,其原理是利用极狭窄的电子束扫描样品后,样品发生二次电子发射,通过二次电子信号的采集成像来获取样品的表面形态。

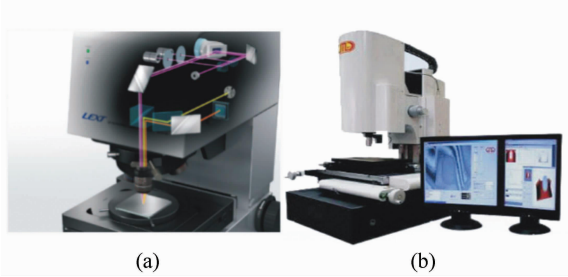

图 8　(a)奥林巴斯 LEXT OLS4100 共聚焦显微镜;(b)泰勒霍普森 Talysurf CCI 白光干涉仪

Fig. 8　(a)OLYMPUS LEXT OLS4100 confocal microscope; (b)Taylor Hobson Talysurf CCI

非接触式测量可以克服接触式测量测量速度慢,不能测量三维形貌的缺点,同样的,各类非接触测量方式也有其局限性。对于光学显微镜,要求被测物表面有一定的反射率,否则容易造成有效数据点缺失而产生较大的测量误差;白光干涉仪只能测较为光滑的表面且要求表面不能有大的倾斜;扫描电子显微镜要求被测物导电,且不能获得精确轮廓形貌数据。

3.3　模具高温形变与磨损

模具的高温形变直接影响玻璃微结构阵列的成形精度,尤其是模压过程中压力分布不均匀的情况下,出现局部微结构变形不一致。为了减少模具高温形变对成形精度的影响,在模具加工中,首先,应尽可能选择热膨胀量小的模具基材,并对模压成形过程进行试验,研究模压前后模具的形变量,确定模压成形带来的宏观形状误差,见图 9;其次,控制模压成形工艺,通过研究成形温度、成形压力及模压时间的最优匹配,达到满足微透镜成形精度的基础上尽可能的降低模压成形温度与成形压力,减少玻璃宏观形状误差[77]。

此外,在加热-冷却的温度循环和合模-脱模的压力循环作用下,微透镜模具会出现热疲劳和应力疲劳,而模具材料的疲劳容易造成模具的磨损与失效,因此,有必要对微透镜模具磨损与失效

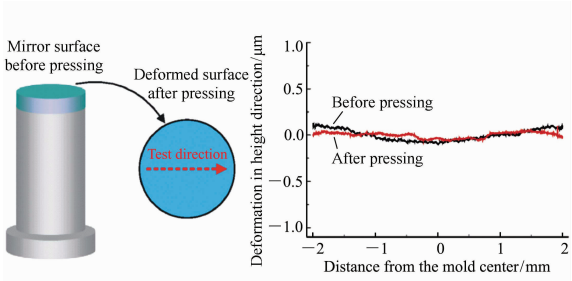

图 9　测量模压前后模具面形精度变化

Fig. 9　Change of mould surface shape accuracy before and after measuring mould pressing

进行预测。所谓模具磨损,是指在成形过程中,模具工作部分由于高温、高压作用下产生的正常变钝现象。而模具破损是指模具发生大的变形或表面有脱落现象产生,导致模具不能正常使用的现象,模具的破损一般是由于高温高压作用使微结构产生了塑性流动而丧失成形能力[78-79]。此外,在微透镜成形过程中,还需要考虑玻璃-模具的粘结造成的模具破损。

3.4　模压成形有限元仿真

目前对宏观球面、非球面透镜的模压成形仿真已经有较多的报道,但是对于微透镜阵列的模压仿真报道较少,主要原因在于相对于玻璃预形体的尺寸,单个微透镜结构尺寸极小,给有限元仿真带来了难度,目前主要仿真手段是采用拉格朗日(Lagrange)算法,并结合自适应网格算法 ALE 进行实时网格重划分,并选取一部分微透镜阵列进行建模仿真,图 10 是北京理工大学先进加工实验室进行的微透镜阵列的模压成形变形图。

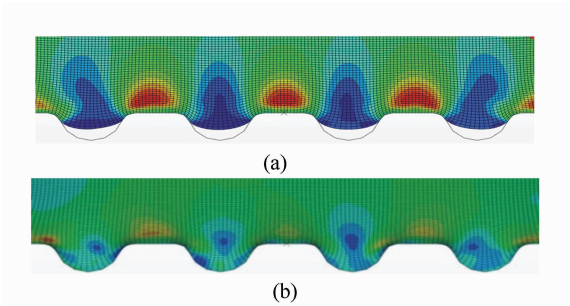

图 10　微透镜阵列的模压成形仿真

Fig. 10　Molding simulation of microlens array

由于三维微透镜阵列模压过程中玻璃材料在填充过程中会产生大变形,传统 Lagrange 算法容易产生畸变造成不能继续计算,而欧拉(Euler)算

法又存在成形边界模糊不清影响计算精度的问题,因此考虑采用流固耦合(CEL)算法进行计算。所谓流固耦合算法,是指对于存在大变形的材料使用 Euler 算法,而对于模具等不易变形的材料,使用 Lagrange 算法,这样既能保证玻璃材料的大变形又不会因为边界不清影响计算精度。此外,实际预形体相对微结构而言是非常大的,如果按照原尺寸建模,将会消耗大量计算资源,因此只建立部分有限元模型,利用 Euler 网格边界特点,设置材料流入流出网格,使模拟更加准确,其中玻璃和模具设置为左右边界对称,进一步降低了对计算机资源的消耗,提高了计算效率。

4 微透镜阵列模压成形技术最新进展

4.1 微透镜阵列材料的多样化

4.1.1 树脂材料

传统的光学树脂材料有聚甲基丙烯酸甲酯(PMAA)、聚苯乙烯(PS)、聚碳酸酯(PC)和聚双烯丙基二甘醇碳酸酯(CR-39)。与光学玻璃相比,光学树脂材料模压温度更低、重量轻、着色方便,但是其缺点也是很明显的,如树脂材料的表面硬度普遍偏低,容易擦伤;折射率低,一般在 1.5 左右,耐热性、耐气候性差,时间长易变色、老化,耐溶脂性也较差等[80-83]。

4.1.2 硫系玻璃

硫系玻璃相对于普通光学玻璃引入了元素周期表第六主族 VIA 族中硫 S、硒 Se、碲 Te 代替氧 O,并引入一定量的其它类金属元素,形成能阻碍可见光透过的透红外玻璃。传统的红外透镜主要是由锗单晶通过机械加工而成,成本高,效率低下。与这种晶体类红外光学材料相比,硫系玻璃具有类似于单晶锗 Ge 的红外透过性能,并且可以通过玻璃模压技术达到透镜成形,大大降低了成本,提高了效率。硫系玻璃随着成分的变化其光谱性能也不一样,硫化物玻璃在可见光区有部分透过,而硒化物玻璃和碲化物玻璃在可见光区没有透过,红外截止波长分别是:硫化物玻璃 12 μm,硒化物玻璃15 μm,碲化物玻璃18 μm[84]。当中也可以引入锗 Ge 元素,随着锗 Ge 含量的增加,玻璃的密度、硬度、软化温度和化学稳定性增加,膨胀系数减小,本征吸收边向长波方向移动,但是折射率系数 dn/dt 会随之变大,导致退火阶段折射率变化更大。

硫系玻璃在中远红外波段具有很好的透过率,并且具有极佳的消热差性能,是新一代温度自适应红外光学系统核心透镜材料。硫系玻璃的主要应用有探测物体和人的红外辐射,热成像,中远红外的透过窗口,以及作为整流罩材料等,广泛应用于军用和民用夜视系统、温度测量系统及红外制导等[85]。目前,硫系玻璃被视为最有可能代替单晶锗 Ge 用于红外光学透镜系统的透红外材料[86]。

对硫系玻璃的模压成形评估有几个方面,对模具表面的复制特征、红外透过率、X 射线衍射分析,而对以上几个方面的控制可以通过对温度的控制完成。温度升高的同时,也伴随着硫化物更大程度的生成和蒸发,并且形成各种尺寸的气泡。但是温度太低,玻璃流动不充足,不能在短时间内很好地复制模具的形貌。硫系玻璃在模具上的粘附情况和透镜破损情况都取决于模压过程中的初始加热温度和模压温度[87-90]。所以温度的控制对透镜模压成形的控形控性非常重要。图 11 为模压得到的红外玻璃非球面镜片。

图 11 红外玻璃非球面透镜

Fig. 11 Aspheric lens of infrared glass

综上所述,对于红外玻璃透镜模压成形,存在以下的发展趋势:(1)通过控制成形温度等成形条件提高硫系玻璃成形精度,改善光学特性;(2)通过控制成形压力等成形条件,减小残余应力,提高红外透镜的光学特性(折射率等);(3)通过控制界面接触与摩擦,提高模具寿命与成形质量;(4)通过控制冷却速率,进一步控制红外材料的

微观组成与晶体结构以改善光学特性。

4.1.3　晶体材料

硒化锌(ZnSe)材料是半导体化合物,按照材料功能分,它属于透光材料,被用来制作全/半反射镜、中红外镜片、远红外大小功率激光器上的各种透镜,镀金反射镜、圆偏振镜及扩束镜等,图 12 为硒化锌材料制备的窗口片[91]。晶体材料的模压成形还处于探索阶段,目前主要面临的问题是模压过程中温度的提高会造成材料内部组织的变化,从而改变材料的光学特性。需要注意的是该材料属于 B 级无机剧毒物品,操作时需要注意防护。

图 12　硒化锌材料窗口片

Fig. 12　Optical windows of Zinc selenide

4.2　模具材料及其表面镀层技术

4.2.1　新型模具材料氧化石墨烯磷化镍 GO-Ni-P

石墨烯发现于 2004 年,是一层石墨(六角型排列的碳原子),石墨烯的杨氏模量高达 1 TPa,固有强度高达 130 GPa,基于其优异的机械性能和独特的二维纳米结构,在化学镀 Ni-P 镀层的基础上,拟采用石墨烯作为第三相,使之与 Ni-P 合金共沉积从而得到复合镀层以改善镀层的机械性能。但由于石墨烯纳米片会由于 π-π 堆叠作用以及范德华力作用而发生团聚,在镀液中难以分散。而氧化石墨烯具有环氧基,羟基,羧基等官能团,使其具有很好的亲水性加上静电排斥作用从而使得氧化石墨烯在水溶液中具有很好的分散效果[92-93]。

氧化石墨烯的加入会在很大程度上影响 Ni-P 的生长。纳米粒子作为形核质点,能够改变镀层的结晶过程,减小了晶粒尺寸,甚至可以使其达到纳米尺寸,形成纳米晶,从而提高晶粒数量。所得镀层表面细密而均匀,镀层的机械性能得到提高。图 13(a)为北京理工大学先进加工实验室通过化学镀方式制备得到的氧化石墨烯磷化镍 GO-Ni-P 镀层,图 13(b)为对该镀层进行的 XRD 分析,可以看到表面有明显的碳和氧原子,证明镀层制备成功。但是对该镀层的材料均匀性及加工性能测试还有待于进一步展开研究。

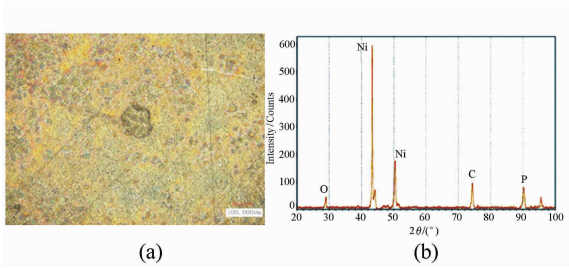

图 13　(a)氧化石墨烯磷化镍 GO-Ni-P 镀层;(b)镀层 XRD 分析结果

Fig. 13　(a) GO-Ni-P coating; (b) XRD analysis of GO-Ni-P coating

4.2.2　表面镀层技术

为了达到减少模具的磨损,改善模具的抗磨损性能、减少由于脱模造成的玻璃黏接,提高模具寿命等目的,镀膜材料需要具备良好的热稳定性,以防镀膜与光学玻璃材料发生反应。镀膜材料通常选择过渡族金属与非金属构成的化合物、金属间化合物等,目前应用较广泛的有:贵金属及其合金、类金刚石碳(DLC)及硼氮化物。

贵金属及其合金主要为铂-铱贵金属膜,该类镀层具有高熔点(1 650 ℃);该镀层对高温玻璃具备较好的化学稳定性,同时在高温下具备一定的强度和延展性[94-95],但是该类金属镀层与某些模具基体材料结合强度不高,容易发生脱落造成模具的损坏,在微透镜阵列模具的镀膜中需要慎重使用。

碳系类薄膜主要包括类金刚石碳(DLC)及碳纳米管(CNT)。类金刚石碳(DLC)是一种相对容易制备的材料,具有耐高温、低热膨胀系数、高化学阻抗性和较低的润湿等特性。普通类金刚石碳在高温时会扩散出碳,与光学玻璃产生反应,从而造成玻璃成形件的污染甚至模具的损坏,后来有学者提出在类金刚石镀膜中添加钛元素以阻止其与玻璃材料的反应,并成功使用在硼硅酸盐玻璃的模压成形中。图 14 为北京理工大学在 Ni-P 镀

层模具表面通过气象沉淀镀 DLC 镀层后的模具。

图 14 镀 DLC 后的平面模具

Fig. 14 Planar mold plated with DLC

硼氮化物主要是以 Ni-Al、Ni-Al-N、Ti-B-C、Ti-B-C-N 作为模芯的镀膜，这些镀膜在高温下都有良好的化学稳定性和抗氧化能力，在高温下与玻璃的润湿角大，能够显著降低界面的摩擦。

4.3 超声复合加工

通常将频率高于人类听觉极限 20 kHz 的振动称为超声振动，高频/超声振动在材料塑性成形领域有着显著的优势，在微成形领域，由于容易实现而有更广泛的前景，其作用机理还有待于进一步完善，目前主要从应力叠加、声波软化及摩擦力降低三个方面进行解释。Zhou 等人通过进行超声振动模压试验，研究了超声振动对摩擦系数的减小作用；通过建立有限元模型，验证了极短时间内模具与玻璃预形体的短暂分离现象，见图 15；解析了超声振动对玻璃预形体动态粘度的影响机理，通过试验和仿真验证了超声振动对模压成形填充精度的改善作用[77-79]。

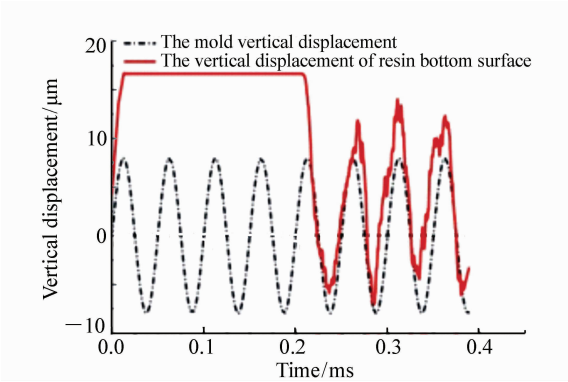

图 15 成形不同振动时刻预形体底面与模具相对位置

Fig. 15 Vertical displacement of mold and the preform's bottom surface at different vibration moment in shaping

5 结束语

微透镜阵列作为一种光学元件，在复杂光学系统中有着广泛需求，而模压成形作为一种高效、高精度、低成本的微透镜阵列加工方式，具有其他加工方式不可比拟的优点，应用前景广阔。微透镜阵列模压成形制造的发展趋势主要有以下 3 个方面。

(1)低熔点光学玻璃材料的研究与开发。低的转化温度有利于提高模具寿命，降低微透镜阵列制造成本。此外，具有更多功能的新材料微透镜阵列的开发也是一大研究热点。

(2)高温条件下玻璃的流变力学特性，微尺度下玻璃与模具的界面作用机理还有待于进一步研究，需要建立更精确的预测模型。

(3)对微透镜阵列模压成形模具的优化。在满足微透镜阵列模具精度、寿命要求的前提下，开发更适合加工的，成本更低的模具材料，有利于微透镜阵列模压成形的推广。将模具表面镀层、复合加工技术引入微透镜阵列的模压成形，有利于改善脱模特性，提高模具寿命。

参考文献：

[1] CHOI K, KIM J, LIM Y, *et al.*. Full parallax viewing-angle enhanced computer-generated holographic 3D display system using integral lens array[J]. *Optics Express*, 2005, 13(26): 10494-502.

[2] KIM D H, ERDENDBAT M U, KWON K C, *et al.*. Real-time 3D display system based on computer-generated integral imaging technique using enhanced ISPP for hexagonal lens array[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(34): 8411-8.

[3] KIM Y, PARK J H, CHOI H, *et al.*. 53.4: Viewing-angle-enhanced 3-D integral imaging system using a curved lens array [J]. *Optics Express*, 2004, 12(3): 421-9.

[4] KHANNA H K,SHARMA D D,LAROIYA S C. Microlens arrays for integral imaging system[J]. *Applied Optics*,2006,45(36):9066-78.

[5] 彭玉颜,周雄图,张永爱,等. 用于集成成像 3D 显示的曲面微透镜阵列设计与仿真[J]. 光子学报,2016,45(3):149-154.
PENG Y Y,ZHOU X T,ZHANG Y A,*et al*.. Design and simulation of curved microlens array for integral imaging 3D display[J]. *Acta Photonica Sinica*,2016,45(3):149-154. (in Chinese)

[6] 袁艳,周宇,胡煌华. 光场相机中微透镜阵列与探测器配准误差分析[J]. 光子学报,2010,39(1):123-126.
YUAN Y,ZHOU Y,HU H H. Registration error analysis for microlens array and photosonser in light field camera[J]. *Acta Photonica Sinica*,2010,39(1):123-126. (in Chinese)

[7] 钟可君,高益庆,李凤,等. 微透镜阵列提高 LED 多芯片封装取光效率的仿真[J]. 半导体光电,2013,34(3):432-435.
ZHONG K J,GAO Y Q,LI F,*et al*.. Simulation on enhancement of light extraction efficiency of multi-chips LED array package with micro-lens array[J]. *Semiconductor Optoelectronics*,2013,34(3):432-435. (in Chinese)

[8] 崔崧,高应俊,阮驰,等. 一种新型微透镜阵列成象式投影光刻系统的研究[J]. 光子学报,2002,31(6):769-773.
CUI S,GAO Y J,RUAN CH,*et al*.. A microlens projection photolithographic system[J]. *Acta Photonica Sinica*,2002,31(6):769-773. (in Chinese)

[9] 庄孝磊,周芳,陈林森. 微透镜阵列光扩散片特性研究及制备[J]. 苏州大学学报:自然科学版,2009,25(4):48-52.
ZHUANG X L,ZHOU F,CHEN L S. The research of micro-lens array diffuser and its fabrication[J]. *J. Suzhou University*:Natural Science Edition,2009,25(4):48-52. (in Chinese)

[10] 陈四海,李毅. 衍射微透镜阵列的光学性能研究及测试[J]. 激光与光电子学进展,2000,6:13-18.
CHEN S H,LI Y. Optical properties theory and measurement of diffractive microlens arrays[J]. *Laser & Optronics Progress*,2000,6:13-18. (in Chinese)

[11] 殷智勇,汪岳峰,贾文武,等. 基于微透镜阵列光束均匀化的傅里叶分析[J]. 激光与红外,2012,42(2):119-123.
YIN ZH Y,WANG Y F,JIA W W,*et al*.. Fourier analysis of light beam uniformity based on the microlens array[J]. *Laser & Infrared*,2012,42(2):119-123. (in Chinese)

[12] 刘志辉,杨欢,石振东,等. 衍射微透镜阵列用于面阵半导体激光光束匀化[J]. 中国激光,2014(1):21-25.
LIU ZH H,YANG H,SHI ZH D,*et al*.. Homogenization of the semiconductor laser planar array using diffractive microlens array[J]. *Chinese J. Lasers*,2014(1):21-25. (in Chinese)

[13] 于双双,史宣,杜吉,等. 基于二维微透镜阵列增大手术显微镜出瞳直径方法研究[J]. 红外与激光工程,2014,43(10):3342-3346.
YU SH SH,SHI X,DU J,*et al*.. 2D microlens array-based surgical microscope in optical system's exit pupil expander[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2014,43(10):3342-3346. (in Chinese)

[14] BACHMANN F,LOOSEN P,POPRAWE R. *High Power Diode Lasers*[M]. New York:Springer,2007.

[15] SUN H. Laser diode beam basics,manipulations and characterizations[J]. *Springerbriefs in Physics*,2012.

[16] 张占强,张岩. 基于微透镜阵列的光场成像系统[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2016,37(1):15-19.
ZHANG ZH Q,ZHANG Y. Light field imaging with micro lens array[J]. *J. Capital Normal University*(Natural Sciences Edition),2016,37(1):15-19. (in Chinese)

[17] 张健,辛悦,刘伟奇,等. 基于微透镜阵列的三维数字成像[J]. 光学 精密工程,2009,7(7):1701-1706.
ZHANG J,XIN Y,LIU W Q,*et al*.. Three-dimensional digital imaging based on microlens array[J]. *Opt. d Precision Eng*.,2009,7(7):1701-1706. (in Chinese)

[18] 郝劲波,忽满利,李林森,等. 基于微透镜阵列的实时三维物体识别[J]. 光子学报,2007,36(11):2008-2012.
HAO J B,HU M L,LI L,*et al*.. Real-time three-dimensional object recognition with microlens array[J]. *Acta Photonica Sinica*,2007,36(11):2008-2012. (in Chinese)

[19] YUAN Y,ZHOU Y,HUANG-HUA H U. Registration error analysis for microlens array and photosonser in light field camera[J]. *Guangzi Xuebao/acta Photonica Sinica*,2010,39(1):123-126.

[20] 刘倩. 基于微透镜阵列的红外多目标/背景复合系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

LIU Q. Research on infraed multi-target and background compounding system based on microlens array[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2014. (in Chinese)

[21] HUANG C,CHEN H,LI J,*et al.*. System design and description of infrared simulator system based on the multidimensional flight table[J]. *SPIE*,2008,7276:72760M-72760M-8.

[22] SAXENA K,JAIN V K,MEHTA D S. A review on the light extraction techniques in organic electroluminescent devices [J]. *Optical Materials*,2009,32(1):221-233.

[23] kwon h,yee y,jeong c h,*et al.*. A high-sag microlens array film with a full fill factor and its application to organic light emitting diodes[J]. *J. Micromechanics & Microengineering*,2008,18(6):1192-1192.

[24] PENG H,HO Y L,YU X J,*et al.*. Coupling efficiency enhancement in organic light-emitting devices using microlens array-theory and experiment[J]. *J. Display Technology*,2005,1(2):278-282.

[25] 蒋小平,刘德森,张凤军,等.一种掩埋式复眼微透镜阵列[J].光电子·激光,2011,23(8):1143-1146.
JIANG X P,LIU D S,ZHANG F J,*et al.*. A compound eye simulated by buried microlens array[J]. *J. Optoelectronics & Laser*,2011,23(8):1143-1146. (in Chinese)

[26] 李向红.新型仿生复眼制备及测试研究[D].中北大学,2013.
LI X H. Manufacturing and testing research of new bionic compound eyes[D]. North University of China,2013. (in Chinese)

[27] 杨元华,陈时锦,程凯,等.超精密机械加工技术在微光学元件制造中的应用[J].航空精密制造技术,2005,4: 10-12.
YANG Y H,CHEN SH J,CHENG K,*et al.*. Application of ultra precision machining to the manufacture of micro-optical components[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*,2005,4:10-12. (in Chinese)

[28] BRINKSMEIER E,PREUSS W,SCHMUTZ J. Manufacturing of microstruc-tures by diamondmachiningin Progress in Precision Engineering andNanotechnology[C],Proc. 9th Int. Proc. Engng. Seminar,Braunschweig,Germany 1997:503-507.

[29] CHOU S Y,KRAUSS P R,RENSTROM P J. Imprint of sub-25nm vias and trenches in polymer[J]. *Applied Physics Letters*,1995,67(21):3114-3116.

[30] ISHII Y,TANIGUCHI J. Fabrication of three-dimensional nanoimprint mold usinginorganic resist in low accelerating voltage electron beam lithography[J]. *Microelectronic Engineering*,2007,84(5):912-915.

[31] REINSPACH J,LINDBLOM M,VON HOFSTEN O,*et al.*. Cold-developed e-beam-patterned ZEP 7000 for fabrication of 13 nm nickel zone plates[J]. *J. Vacuum Science & Technology*,2009,27(6):2593-2596.

[32] 佟军民,胡松,董小春,等.工件台移动直线性对掩模移动曝光的影响[J].光电工程,2007,34(11): 55-60.
TONG J M,HU S,DONG X CH,*et al.*. Effect of stage moving linear error on exposure in mask moving technique[J]. *Opto-Electronic Engineering*,2007,34(11):55-60. (in Chinese)

[33] 阎嫦玲,鲁平,刘德明,等.与光纤阵列耦合的微透镜阵列设计与损耗分析[J].光电子·激光,2006,17(9):1043-1047.
YAN C L,LU P,LIU D M,*et al.*. Design of micro lens arrays coupling with fiber arrays and analysis of the coupling loss [J]. *J. Optoelectronics · Laser*,2006,17(9):1043-1047. (in Chinese)

[34] SMITH H I,SPEARS D L,BERNACKI S E. X-ray lithography: a complementary techniqueto electron beam lithography [J]. *J. Vacuum Science and Technology*,1973,10(6):913-917.

[35] JUNARSA I,NEALEY P F. Fabrication of masters for nanoimprint, step and flash,and soft lithography using hydrogen silsesquioxane and X-ray lithography[J]. *J. Vacuum Science & Technology*,2004,22(6):2685-2690.

[36] LIU L,LOH N H,TAY B Y,*et al.*. Preparation and characterization of micro components fabricated by micro powder injection molding[J]. *Materials Characterization* 2011,62(6):615-620.

[37] YI A Y,JAIN A. Compression molding of aspherical glass lenses-a combined experimental and numerical analysis[J]. *J. American Ceramic Society*,2005; 88(3):579-586.

[38] KOLAŘÍK J,PEGORETTI A. Proposal of the Boltzmann-like superposition principle for nonlinear tensile creep of thermoplastics[J]. *Polymer Testing*,2008,27(5):596-606.

[39] BARBERO E J. Time-temperature-age superposition principle for predicting long-term response of linear viscoelastic mate-

rials-creep and fatigue in polymer matrix composites-2[J]. *Creep & Fatigue in Polymer Matrix Composites*,2011:48-69.

[40] JALOCHA D,CONSTANTINESCU A,NEVIERE R. Revisiting the identification of generalized Maxwell models from experimental results[J]. *International J. Solids & Structures*,2015,67:169-181.

[41] 张勇,张斌珍,吴淑娟,等.主光轴平行于基底的微透镜阵列制作与测试[J].微纳电子技术,2013,50(1):47-51.
ZHANG Y,ZHANG B ZH,WU SH J,*et al*.. Fabrication and measurement of microlens arrays with primary optical axis paralleled to wafers[J]. *Micronanoelectronic Technology*,2013,50(1):47-51.(in Chinese)

[42] YAN X,YANG J,XUE B,*et al*.. Design of the microlens arrays coupling with imaging fiber bundle[J]. *Optoelectronics Letters*,2013,9:169-172.

[43] CHEN W,ZHANG X,LIU X,*et al*.. Optical design and simulation of a compact multi-aperture camera based on a free-form microlens array[J]. *Optics Communications*,2015,338:300-306.

[44] 柯才军.微透镜阵列的设,计制作及与 CCD 的集成技术[D].华中科技大学,2005.
KE C J. Research on design, fabrication of microlens array and integration between microlens arrays and CCD image sensors[D]. Huazhong University of Science & Technology,2005.(in Chinese)

[45] TREMAIN D E,MEI K K. Application of the unimoment method to scattering from periodic surfaces[J]. *J. Opt. Soc. Am.*,1978,68(6):775-783.

[46] PENG S T,TAMIR T,BERTONI H L. Theory of periodic dielectric waveguides[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*,1975,23(1):123-133.

[47] MOHARAM M G,GAYLORD T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar grating diffraction[J]. *J. Opt. Soc. Am.*,1981,71(7):811-818.

[48] 唐勇,李玉瑶.ZEMAX 在光学设计外形尺寸计算中的应用[J].长春理工大学学报,2009(2):193-196.
TANG Y,LI Y Y. ZEMAX's application in dimension calculation of optical design[J]. *J. Changchun University of Science and Technology*(Natural Science Edition),2009(2):193-196.(in Chinese)

[49] LI L,ALLEN Y Y. Design and fabrication of a freeform microlens array for a compact large-field-of-view compound-eye camera[J]. *Applied Optics*,2012,51(12):1843-1852.

[50] ZHOU T F,YAN J W,MASUDA J,*et al*.. Ultraprecision mass fabrication of aspherical fresnel lens by glass molding press[J]. *Advanced Materials Research*,2011,325:713-718.

[51] ZHOU T,YAN J,MASUDA J,*et al*.. Investigation on the viscoelasticity of optical glass in ultraprecision lens molding process[J]. *J. Materials Processing Technology*,2009,209(9):4484-4489.

[52] GMP TOSHIBA MACHINE. http://www.toshiba-machine.co.jp/cn/product/nano/lineup/gmp/index.html[EB/OL][2016-08-15].

[53] 尹韶辉,张乐贤,陈逢军,等.小口径非球面加工技术及装备综述[J].光学技术,2013,2:103-111.
YIN SH H,ZHANG X L,CHEN F J,*et al*.. Review of mechining technology and equipment foe small aspheric surface[J]. *Optical Technology*,2013,2:103-111.(in Chinese)

[54] 尹韶辉,王玉方,朱科军,等.微小非球面玻璃透镜超精密模压成型数值模拟[J].光子学报,2010,39(11):2020-2024.
YIN SH H,WANG Y F,ZHU K J,*et al*.. Numerical simulation of ultraprecision glass molding for micro aspherical glass lens[J]. *Acta Photonica Sinica*,2010,39(11):2020-2024.(in Chinese)

[55] YI A Y,JAIN A. Compression molding of aspherical glass lenses-a combined experimental and numerical analysis[J]. *J. American Ceramic Society*,2005,88(3):579-586.

[56] KOLAŘÍK J,PEGORETTI A. Proposal of the Boltzmann-like superposition principle for nonlinear tensile creep of thermoplastics[J]. *Polymer Testing*,2008,27(5):596-606.

[57] OHARA CORPORATION. http://www.ohara-inc.co.jp/jp/product/electronics/index.html[EB/OL].[2016-08-01].

[58] 株式会社住田光学ガラスhttp://www.sumita-opt.co.jp/ja/[EB/OL].[2016-08-10].

[59] BARBERO E J. 2-Time-temperature-age superposition principle for predicting long-term response of linear viscoelastic materials[J]. *Creep & Fatigue in Polymer Matrix Composites*,2011:48-69.

[60] JALOCHA D,CONSTANTINESCU A,NEVIERE R. Revisiting the identification of generalized Maxwell models from experimental results[J]. *International J. Solids & Structures*,2015,67:169-181.

[61] HAYAT T,KHAN M,ASGHAR S. On the MHD flow of fractional generalized Burgers' fluid with modified Darcy's law [J]. *Acta Mechanica Sinica*,2007,23(3):257-261.

[62] ANURAG J,YI A Y. Numerical modeling of viscoelastic stress relaxation during glass lens forming process[J]. *J. American Ceramic Society*,2005,88(88):530-535.

[63] LIPATOV Y S. Viscoelasticity of polymeric composites containing dispersed and fibrous fillers[J]. *Mechanics of Composite Materials*,1981,16(5):541-553.

[64] YAN J,OOWADA T,ZHOU T,*et al.*. Precision machining of microstructures on electroless-plated NiP surface for molding glass components[J]. *J. Materials Processing Technology*,2009,209(10):4802-4808.

[65] ZHOU T,YAN J,MASUDA J,*et al.*. Investigation on shape transferability in ultraprecision glass molding press for microgrooves[J]. *Precision Engineering*,2011,35(2):214-220.

[66] 关佳亮,陈志德,曹成国,等.大直径菲涅尔透镜模具加工发展现状及展望[J].机械设计与制造,2012,8:37-40.
GUAN J L,CHEN ZH D,CAO CH G,*et al.*. Development status and prospects of large diameter Fresnel lens mould machining[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*,2012,8:37-40. (in Chinese)

[67] 王泽彪.微小非球面碳化钨模具的斜轴磨削及超声抛光工艺研究[D].长沙:湖南大学,2011.
WANG Z B. Inclined axis grinding for WC micro aspheric mould and ultrasonic vibration assisted finishing properties study[D]. Changsha:Hunan Uinversity,2011. (in Chinese)

[68] CARDARELLI F. Materials handbook: a concise desktop reference[J]. *Materials & Design*,2001,22(3):237-237.

[69] FIRESTONE G C,YI A Y. Precision compression molding of glass microlenses and microlens arrays—an experimental study[J]. *Applied Optics*,2005,44(29):6115-22.

[70] 王美成,廖广兰,史铁林.小型非球面光学元件测量技术研究[J].计测技术,2007,27(4):1-4.
WAN M CH,LIAO G L,SHI T L. Research on the measurement of small optical element with aspheric surface[J]. *Metrology & Measurement Technology*,2007,27(4):1-4. (in Chinese)

[71] ROKICKI R,HAIDER W,HRYNIEWICZ T. Influence of sodium hypochlorite treatment of electropolished and magneto-electropolished nitinol surfaces on adhesion and proliferation of MC3T3 pre-osteoblast cells[J]. *J. Materials Science Materials in Medicine*,2012,23(9):2127-39.

[72] YOKAICHIYA M,FUNABASHI T,TAKAYA Y. The high precision measurement of the minute shape by the UA3P series [C]. JSPE Semestrial Meeting: The Japan Society for Precision Engineering,2011:878-879.

[73] 吉住,恵一.超高精度三次元測定機 UA3Pによる自由曲面の測定—自由曲面を10万分の1ミリメートル精度で測定[J]. *Optical Alliance*,2008,19:32-37.

[74] WEBER K,FENDL D,HEIN F,*et al.*. Sperm evaluation by 3D laser scanning microscopy(Olympus LEXT Ols4000) [J]. *Toxicology Letters*,2013,229(3):228-228.

[75] 潘永强,吴振森,杭凌侠,等.多层介质薄膜膜层间界面粗糙度及光散射[J].红外与激光工程,2009,38(3):433-436.
PAN Y Q,WU ZH S,HANG L X,*et al.*. Interface roughness of multilayer dielectric optical thin film[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2009,38(3):433-436. (in Chinese)

[76] ZHOU T,YAN J,LIANG Z,*et al.*. Development of polycrystalline Ni-P mold by heat treatment for glass microgroove forming[J]. *Precision Engineering*,2014,39:25-30.

[77] XIE J,ZHOU T,LIU Y,*et al.*. Mechanism study on microgroove forming by ultrasonic vibration assisted hot pressing [J]. *Precision Engineering*,2016,46:270-277.

[78] XIE J Q,ZHOU T F,LIU Y,*et al.*. The Effects of Ultrasonic Vibration in Hot Pressing for Microgrooves[C]. Materials Science Forum,2016,861:121-126.

[79] 李祥明,邵金友,丁玉成,等.基于空间调制电场诱导去润湿的曲率可控微透镜阵列制造[J].中国科技论文在线,2014.
LI X M,SHAO J Y,DING Y CH,*et al.*. Fabrication of microlens arrays with controlable curvature based on electrically

induced dewetting by spatially modulcated electricfiled[J]. *Sciencepaper Online*,2014. (in Chinese)

[80] 洪水金,常洪龙,寻文鹏,等. 基于 PDMS 薄膜的微透镜制作方法[J]. 微纳电子技术,2014(4):257-261.
HONG SH J,CHANG H L,XUN W P,*et al*.. A fabrication method for micro lens based on the PDMS menbrance[J]. *Micronanoelectronic Technology*,2014(4):257-261. (in Chinese)

[81] NAKAI J. Colored microlens array and manufacturing method for colored microlens array,color solid-state image capturing device and manufacturing method for color solid-state image capturing device,color display apparatus and manufacturing method for color display:US,8274031 B2[P]. 2012-09-25

[82] 孙鸿达. 用于曲面复眼成像系统的啁啾微透镜阵列[D]. 厦门大学,2014.
SUN H D. Chriped micro lens array for compound eye imaging system on curved surface[D]. Xiamen university,2014. (in Chinese)

[83] 刘永华,祖成奎,赵华,等. 红外热成像系统用硫系玻璃的熔制技术[J]. 红外与激光工程,2015,42(5):1472-1476.
LIU Y H,ZHAO CH K,ZHAO H,*et al*.. Melting technology of chalcogenide glass for infrared thermal imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2015,42(5):1472-1476. (in Chinese)

[84] 戴世勋,陈惠广,李茂忠,等. 硫系玻璃及其在红外光学系统中的应用[J]. 红外与激光工程,2012,41(4):847-852.
DAI SH X,CHEN H G,LI M ZH,*et al*.. Chalcogenide glasses and their infrared optical applications[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2012,41(4):847-852. (in Chinese)

[85] 坚增运,曾召,董广志,等. 硫系红外玻璃的研究进展[J]. 西安工业大学学报,2011,31(1):1-8.
JIAN Z Y,ZENG ZH,DONG G ZH,*et al*.. Progress in the research of chalcogenide glasses for infrared transmission[J]. *J. Xi'an Technological University*,2011,31(1):1-8. (in Chinese)

[86] LI J,WANG M,WANG,*et al*.. Preparation and optical properties of dispersible ZnS enanocrystals synthesized by high energy ball milling[J]. *Ceramics International*,2008,34(4):1077-1080.

[87] PEJOVA B,GROZDANOV I. Three-dimensional confinement effects in semiconducting zinc selenide quantum dots deposited in thin-film form[J]. *Materials Chemistry & Physics*,2005,90(1):35-46.

[88] CHANG S,HUANG B,CHEN X,*et al*.. Facile synthesis and characterization of water soluble ZnSe/ZnS quantum dots for cellar imaging[J]. *Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy*,2013,104C(3):143-149.

[89] 潘永强,杭凌侠,梁海锋,等. 硒化锌基底 2 ~ 16 μm 超宽带硬质红外增透膜的研制[J]. 光学学报,2010,30(4):1201-1204.
PAN Y Q,HANG L X,LIANG H F,*et al*.. Ultrabroad band and hard infrared antiflection coatings on ZnSe for 2 ~ 16 μm [J]. *Actaopticasinica*,2010. 30(4):1201-1204. (in Chinese)

[90] 冯博. ZnSe 纳米材料的制备及光学、光催化性能研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013.
FENG B. Investigation on the synthesis optical and photocatalytic properties of ZnSe nanomaterials[D]. Beijing:Graduate University of Chinese Academy of Sciences,2013. (in Chinese)

[91] 黄毅,陈永胜. 石墨烯的功能化及其相关应用[J]. 中国科学,2009,30(4):887-896.
HUANG Y,CHEN Y SH. Functionalization of graphene and their applications[J]. *Scichina*,2009(9):887-896. (in Chinese)

[92] 徐秀娟,秦金贵,李振. 石墨烯研究进展[J]. 化学进展,2009(12):2559-2567.
XU X J,QIN J G,LI ZH. Research advances of graphene[J]. *Progress in Chemistry*,2009(12):2559-2567. (in Chinese)

[93] 张永康. 石墨烯的制备及其摩擦学性能研究[D]. 南京理工大学,2013.
ZHANG Y K. Research on graphene preparation and its tribological properties[D]. Nanjing University of Science & Technology,2013. (in Chinese)

[94] CHEN C S. Carbon nanotubes reinforced nickel-phosphorus base composite coating[J]. *Acta Physica Sinica*,2004,53 (2):531-536.

[95] ZHU Y,MURALI S,CAI W,*et al*.. Graphene and graphene oxide:synthesis, properties, and applications[J]. *Advanced Materials*,2010,22(35):3906-24.

作者简介：

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”引进人才，2009 年于日本东北大学获得博士学位，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

梁志强（1984—），男，内蒙古赤峰人，博士，副教授，硕士生导师，2011 年于北京理工大学获得博士学位，主要从事精密与超精密切削磨削技术，超声辅助加工技术，微细刀具设计与制造技术等方面的研究。E-mail：liangzhiqiang@ bit. edu. cn

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊，A4 开本；刊号：ISSN 2095-1531/CN 22-1400/O4；国内外公开发行，邮发代号：国内 12-140，国外 BM6782。

- ★ 荷兰 Scopus 数据库
- ★ 美国《乌利希国际期刊指南》
- ★ 美国《化学文献》
- ★ 波兰《哥白尼索引》
- ★ 俄罗斯《文摘杂志》
- ★ 中国精品科技期刊
- ★ 中国科技核心期刊
- ★ 中国光学学会会刊
- ★ 中国科技论文与引文数据库
- ★ 中国期刊全文数据库
- ★ 万方数字化期刊全文数据库
- ★ 中国科技期刊数据库
- ★ 中国光学期刊网数据库

主要栏目：微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型：学术价值显著、实验数据完整的原创性论文；研究前景广阔，具有实用、推广价值的技术报告；有创新意识，能够反映当前先进水平的阶段性研究简报；对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告；以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位：中国科学院
主办单位：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
协办单位：激光与物质相互作用国家重点实验室
编辑出版：《中国光学》编辑部
投稿网址：http://chineseoptics. net. cn
邮件地址：chineseoptics@ ciomp. ac. cn；zggxcn@ 126. com
联系电话：0431-86176852；0431-84627061　　传　真：0431-84627061
编辑部地址：长春市东南湖大路 3888 号（130033）