

文章编号 1004-924X(2017)09-2421-07

微拱形阵列导光板快速热压成型与微光学应用

谢晋*, 江宇宁, 卢阔, 胡满凤

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东广州 510640)

摘要:微透镜阵列热压精密成型需要时间保温,生产效率较低。因此,提出在模芯加热表面的微沟槽阵列上对聚合物导光板进行热压,使工件热变形的微米尺度表面层流入微沟槽空间内,快速形成微拱形透镜阵列,而保证工件主体不变形。目的是实现高效率 and 低能耗的微光学透镜阵列热压成型加工。首先,针对导光板表面的微阵列结构和尺寸分析其微光学性能;然后,使用微磨削技术在模芯表面加工出高精度和光滑的微沟槽阵列结构;最后,研究微拱形阵列的快速精密成型工艺及微光学应用。微光学分析显示,微阵列的高度和分布密度对出光面的光照度影响较大。热压工艺实验结果表明,采用深度为 $104\ \mu\text{m}$ 和角度为 121° 的微沟槽阵列模芯,在 $12\ \text{MPa}$ 的压力和 $110\ ^\circ\text{C}$ 的温度下,可以在 $3\ \text{s}$ 内将高度为 $50\ \mu\text{m}$ 的 3D 微拱形阵列导光板快速精密热压成型。本文方法制作的 $87\ \text{mm}\times 84\ \text{mm}$ 的导光板,与市面具有 2D 点阵且高度为 $8.2\ \mu\text{m}$ 的丝网印刷导光板相比,光照度提高了 21% ,光照均匀度提高了 27% 。本文研究将促进微光学精准设计和制造在 LED 照明产业的应用。

关键词:热压微成型;微透镜阵列;微磨削;微光学;导光板

中图分类号: TB853.29 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172509.2421

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

XIE Jin*, JIANG Yu-ning, LU Kuo, HU Man-feng

(College of Mechanical and Automatic Engineering,
South China University of Technology, Guangdong 510640, China)

* Corresponding author, E-mail: jinxie@scut.edu.cn

Abstract: The precision hot embossing of microlens array needs heat preservation time, leading to poor efficiency. Hence, a rapid hot embossing of micro-arch array on polymer light guide plate (LGP) is proposed using a heated microgrooved die core. It only performs a thermal deformation for micro-scale surface layer flowing inside microgroove spaces without changing macro workpiece sizes. The objective is to develop the hot embossing process of microlens array of micro-optics with high machining efficiency and low energy-consumption. First, the micro-optics performances of LGP are analyzed with regard to the shape and size of micro-arch array; then the micro-grinding is employed to machine precision and smooth microgroove array on steel die core; finally, the rapid and accurate forming process of micro-arch array and its micro-optics application are studied. The micro-optics

收稿日期:2017-01-18;修订日期:2017-03-16.

基金项目:广东省自然科学基金重点资助项目(No. 2015A030311015);国家自然科学基金资助项目(No. 61475046);广东省科技计划项目(No. 2014B010104003)

analyses show that the height and distribution density of micro-arch array greatly influence the micro-optics performance. The hot embossing experiments show that by using a microgroove array die core with an average groove depth of $104\ \mu\text{m}$ and an average groove angle of 121° , the $50\text{-}\mu\text{m}$ -height 3D micro-arch array may be precisely formed in 3 s in the case of 12 MPa in loading pressure and $110\ ^\circ\text{C}$ in loading temperature. Compared with the general screen-printing 2D micro-dot array with $8.2\text{-}\mu\text{m}$ -height, the LGP patterned with micro-arch array increases the LGP irradiance intensity by 21% and its uniformity by 27%, respectively. It contributes to the micro-optics precision design and fabrication applied for LED lighting industry.

Key words: micro hot embossing; microlens array; micro-grinding; micro-optics; LGP

1 引言

为减小 LED 照明系统尺寸,微透镜阵列结构导光板(Light Guide Plate, LGP)已经被用于将点光源或者线光源转化为面光源^[1]。目前,市面上常见的丝网印刷的微点阵导光板存在微点阵容易脱落、二维结构难以优化等问题^[2]。后来,研究人员又研究出基于聚合物材料的微透镜阵列,它通常采用注塑成型,可加工复杂结构^[3],但是对于薄壁板件成型较为困难^[4]。

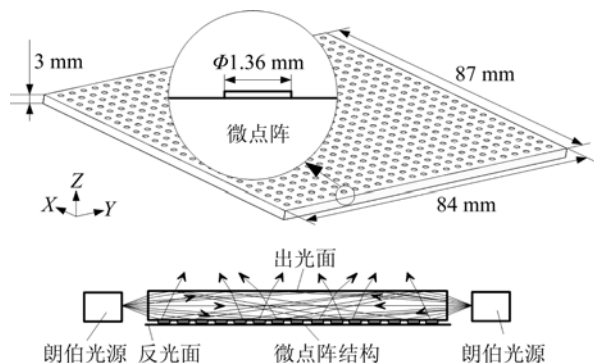
针对注塑成型存在的问题,考虑到热压成型可将模芯表面的微结构复印到工件表面^[5-7]。相关学者对此展开研究,并取得一些成果。Toosi 等人在压力为 $3\sim 12\ \text{MPa}$ 、温度 $170\sim 180\ ^\circ\text{C}$ 以及时间 10 min 的工艺参数下,在 $18\sim 50\ \text{mm}$ 的工件表面完成 $17\sim 120\ \mu\text{m}$ 深度的微圆柱结构热压印成型,用于提高工件表面的接触角^[8]。Wu 等人采用热压成型在 $77\ \text{mm}\times 54\ \text{mm}$ 的工件表面制造出高 $23\sim 24\ \mu\text{m}$ 的微点阵 PMMA 导光板^[9],其工艺参数如下:压力为 25 MPa 的保压、 $130\sim 150\ ^\circ\text{C}$ 的保温、时间为 $30\sim 60\ \text{s}$ 。但是,高压、高温和长保压时间会引起高能量消耗以及低生产效率。

热压微成型模芯可以采用化学刻蚀加工^[10],但很难控制微结构的表面质量和成型精度,无法满足微光学的精准设计要求。此外,微切削技术研究已经得到关注和应用^[11],但尚未能在硬质模具钢表面加工出高精度的微细阵列结构。微铣削加工虽然可用于微阵列结成型模芯制造,但因其表面质量粗糙尚未用于微透镜阵列的快速热压微成型加工^[12]。

在上述背景下,本文提出一种在较低压力和较低温度下将模具钢模芯表面的微槽阵列结构快速复制到聚合物光学材料表面,形成微拱形阵列导光板。首先,分析微拱形阵列透镜结构的微光学特性,然后在模具钢模芯基体上微磨削出微槽阵列结构,用于 $87\ \text{mm}\times 84\ \text{mm}$ 导光板的热压微成型实验。最后检测宏观出光表面的光学性能,并与市面丝网印刷的微点阵导光板进行比较。

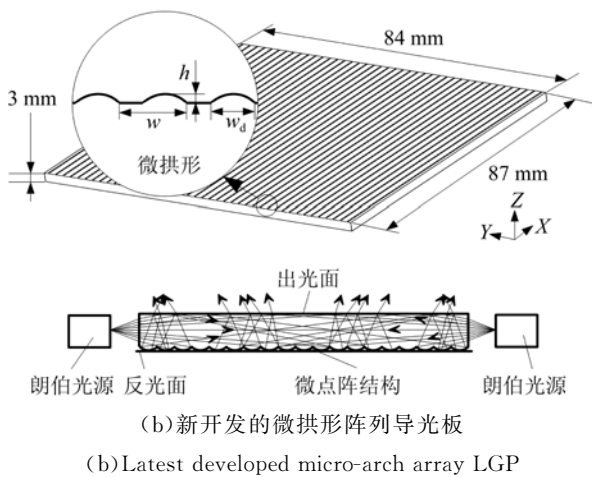
2 微拱形透镜阵列导光板的出光原理

图 1 为微点阵导光板和微拱形透镜阵列导光板的结构模型及其出光原理图。其中导光板长度为 $87\ \text{mm}$ 、宽度为 $84\ \text{mm}$ 。微点阵导光板是采用市面丝网印刷的 LED 照明部件,结构模型如图 1(a)所示。本文提出的微拱形阵列导光板模型如图 1(b)所示,其微阵列间距为 w 、高度为 h 和宽度为 w_1 。通过 TracePro 光学软件分析导光板的微光学特性。在此基础上分别建立朗伯表面光源、反光面和出光面的模型,光源的波长为 $0.5\ \mu\text{m}$ 。



(a)市面的微点阵导光板

(a)General micro-dot array LGP



(b)新开发的微拱形阵列导光板

(b)Latest developed micro-arch array LGP

图 1 微结构导光板及其出光原理

Fig. 1 Microstructured LGPs and their lighting behavior

导光板表面布有微阵列结构,可以破坏光线在表面的全反射条件,从而改变光路投射出光面。出光面照度 I 定义为整个出光面照度的平均值,所以出光均匀度 ψ 可表达为:

$$\psi = I_{\min} / I, \quad (1)$$

其中 I_{\min} 为出光面的最小照度值。

3 模芯微沟槽阵列精密磨削及实验

图 2 为采用磨削方法在模芯表面加工的微沟槽阵列结构原理图。模芯为超镜面模具钢 S136H。首先,采用数控程序将树脂基 # 3000 金刚石砂轮与修整工具对磨,修整出 V 型微尖端,其角度 α 与路径 1 和路径 2 之间的夹角一致^[13],如图 2(a)所示。修整工艺参数为:转速 $N=3\ 000\ \text{r/min}$,进给速度 $v_f=400\ \text{mm/min}$,进给量 $a=2\ \mu\text{m}$ 。

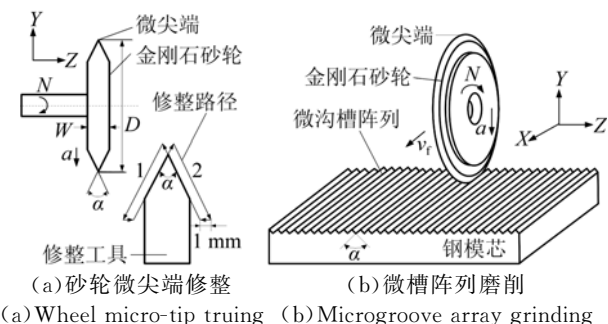


图 2 模芯表面微沟槽阵列的微磨削

Fig. 2 Micro-grinding of microgroove array on die core surface

最后,采用砂轮微尖端对模芯表面进行微沟槽阵列精密磨削,如图 2(b)所示。设计微沟槽角度和深度分别为 120° 和 $100\ \mu\text{m}$ 。微磨削过程在线对砂轮微尖端进行修整,以防止微尖端磨钝磨损。磨削时,砂轮转速 N 为 $3\ 000\ \text{r/min}$;进给速度 v_f 在粗加工时为 $2\ 000\ \text{mm/min}$,在半精加工时为 $400\ \text{mm/min}$,最后为 $200\ \text{mm/min}$;进给量 a 在粗加工时为 $5\ \mu\text{m}$,在半精加工时为 $2\ \mu\text{m}$,最后为 $1\ \mu\text{m}$ 。

4 快速热压微成型方法

图 3 为微拱形阵列的热压微成型模型。在热压过程中,对上模模芯加热,下模工件为常温。模芯向下作用于 PMMA 工件上,当工件温度高于其玻璃态转化温度时转变为熔融状态^[14]。在工件与模芯接触的短暂时间内,工件表层将发生变形,半熔融入微沟槽内,而工件主体不变形,逐渐形成微拱形阵列,如图 3(a)所示。最后,深度为 d_m 的模芯微沟槽内复印出高度为 h 、宽度为 w_d 和半径为 R 的圆弧微拱形结构,如图 3(b)所示。

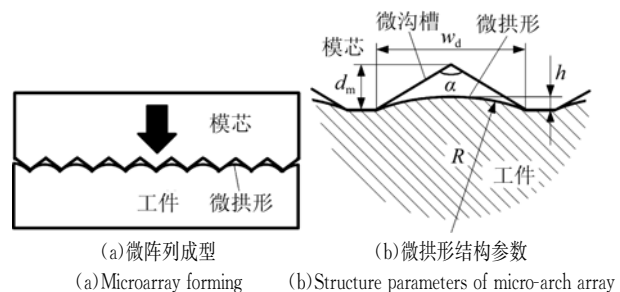


图 3 微拱形阵列热压成型的示意图

Fig. 3 Schematic of micro-arch array hot embossing

5 热压微成型工艺和出光检测

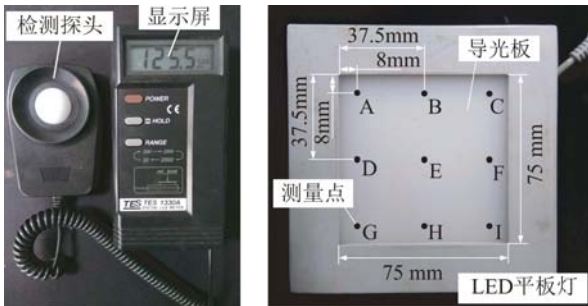
图 4 为自主开发的微热压成型设备。工作台面积为 $400\ \text{mm} \times 400\ \text{mm}$,马力为 $5.5 \times 2\ \text{kW}$ 。模芯尺寸为 $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$,其微沟槽角度 α 为 120° ,深度 d_m 为 $100\ \mu\text{m}$ 。PMMA 导光板基板尺寸为 $84\ \text{mm} \times 87\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ 。热压成型工艺参数初步确定为:保压压力 p 为 $8 \sim 12\ \text{MPa}$,保压时间 t 为 $1 \sim 5\ \text{s}$ 。为了接近材料玻璃化温度。保压温度 $T=110\ ^\circ\text{C}$ 。



图 4 热压微成型的实验装置

Fig. 4 Experimental setup of micro hot embossing

图 5 为导光板检测平台。将导光板置于 LED 平板灯内,使用数字照度计检测 A 点到 I 点的照度值,检测的圆形区域直径为 2 mm。



(a)数字照度计

(a)Digital lux meter

(b)检测点

(b)Measuring points

图 5 导光板出光检测实验

Fig. 5 Light detection experiment of LGP

6 结果与讨论

6.1 微拱形阵列不等间距的仿真分析

图 6 为导光板出光面照度 I 和照度均匀度 ψ 与微拱形阵列分布标准差 σ 间的关系图。微阵列

高度 h 为 $50 \mu\text{m}$ 。由于微拱形阵列间距分布密度符合高斯分布模型,所以利用其标准差 σ 可以优化间距 w 的分布规律。图 6 结果显示,照度 I 和照度均匀度 ψ 先随标准差的增加而增加,当 $\sigma=24$ 时,两者均接近最大。之后,随 σ 的增加而降低。此时设定导光板两端微拱形阵列的间距为 1.3 mm ,根据导光板宽度及阵列间距密度高斯分布函数可得,微拱形阵列间距 w 从导光板两端的 1.3 mm 逐渐减小到中间的 0.65 mm 。

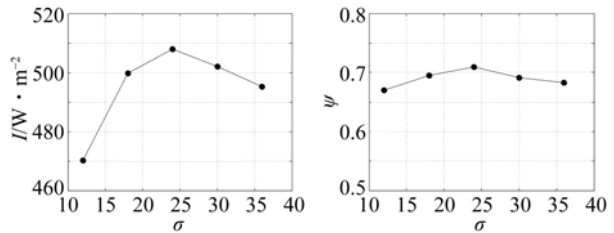


图 6 照度 I 和照度均匀度 ψ 与拱形条分布标准差 σ 的关系

Fig. 6 Irradiance intensity I and irradiance uniformity ψ vary with distribution coefficient σ

6.2 微拱形阵列等间距的仿真分析

图 7 为等间距微拱形阵列的照度 I 、照度均匀度 ψ 、微阵列数 n 与间距 w 的仿真关系。可以看出,随着间距 w 的增大,照度值 I 逐渐减小,微阵列数 n 也逐渐减小,而均匀度则变化不大。当 w 小于 0.5 mm 时,等间距阵列的照度 I 大于不等间距阵列,但是,其均匀度 ψ 要小于不等间距阵列。此外,等间距阵列的微阵列数将大幅增加,导致加工成本增加。综合考虑,本研究选择不等间距的微拱形阵列。

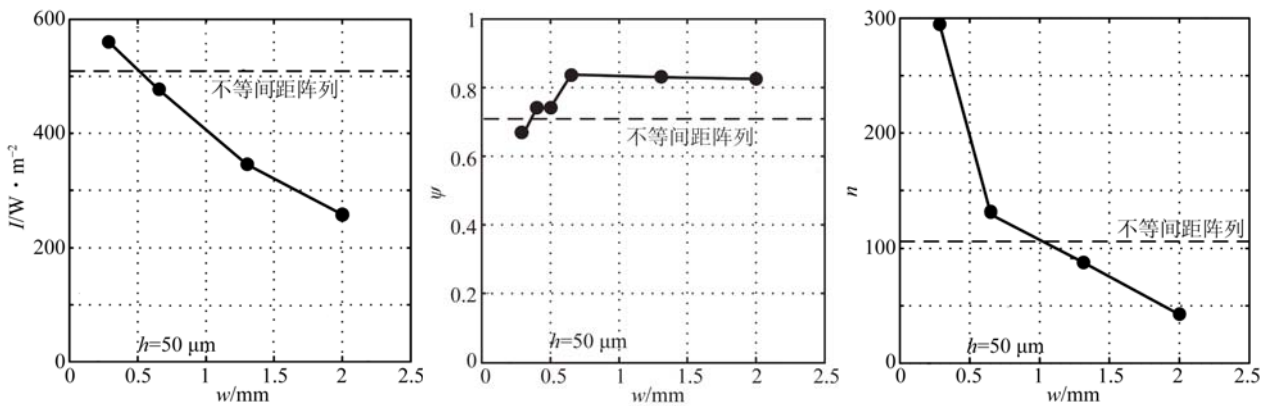


图 7 等间距/不等间距微拱形阵列的光照度 I 、照度均匀度 ψ 和阵列数 n 与阵列间距 w 的关系

Fig. 7 Irradiance intensity I , irradiance uniformity ψ and microarray number n vary with microarray interval w for microarray with uniformly-interval and unequally interval

6.3 微拱形阵列高度的仿真分析

图 8 为照度 I 和均匀度 ψ 与微拱形阵列高度 h 的关系图。由图 8 可知,微拱形透镜阵列导光板的出光照度 I 先随着微阵列高度 h 增加而增加,在 $h=50 \mu\text{m}$ 时接近最大,之后随 h 的增加而降低。另外,均匀度随微阵列高度缓慢增大。

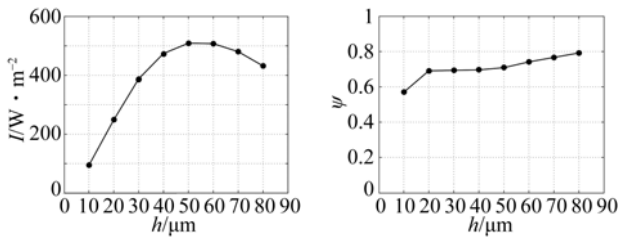
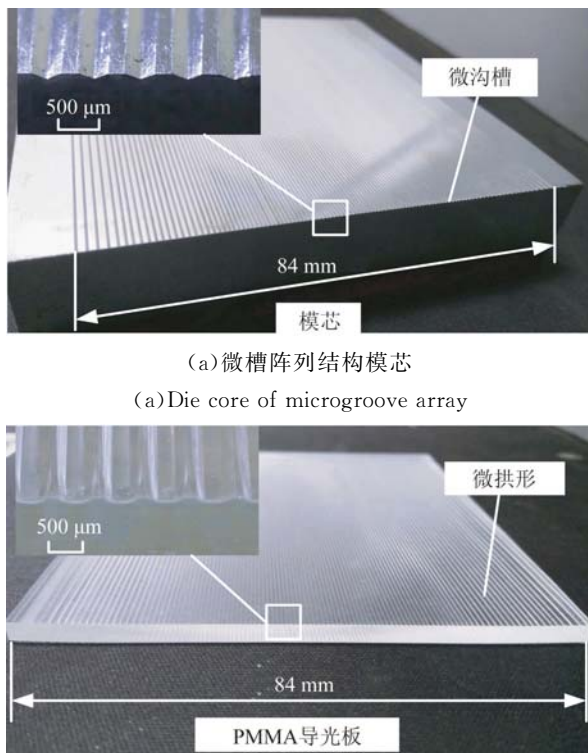


图 8 照度 I 和均匀度 ψ 与微阵列高度 h 的关系

Fig. 8 Irradiance intensity I and irradiance uniformity ψ vary with microarray height h

6.4 微拱形阵列成型工艺研究

图 9 为加工出的钢模芯及导光板的实物和微形貌图。



(a) 微槽阵列结构模芯
(a) Die core of microgroove array

(b) 热压微成型 PMMA 导光板
(b) PMMA LGP through micro hot embossing

图 9 热压成型实验结果

Fig. 9 Experimental results of micro hot embossing

微磨削的钢模芯表面深度平均为 $104.3 \mu\text{m}$, 角度平均为 121.3° , 粗糙度 R_a 为 $0.024 \mu\text{m}$, 尖端半径为 $53.5 \mu\text{m}$, 且表面光滑, 边角整齐, 如图 9(a) 所示, 可用于精准控制热压微成型精度。热压成型后, 导光板表面形成了微拱形阵列, 如图 9(b) 所示, 检测结果显示, 其表面粗糙度 R_a 为 $0.075 \mu\text{m}$ 。由此可得, 利用该方法可以在宏观导光板表面加工出微拱形透镜阵列。

图 10 为模芯微沟槽和工件微拱形的轮廓检测图。在热压成型中, 开始采用的工艺参数为: $p=10 \text{ MPa}$, $t=1 \text{ s}$ 和 $T=110^\circ\text{C}$ 。因压力及时间不足, 形成微山口形, 如图 10(a) 所示。通过反复工艺优化实验发现, 当 $p=12 \text{ MPa}$, $t=3 \text{ s}$ 和 $T=110^\circ\text{C}$ 时, 可以形成完整的微拱形, 如图 10(b) 所示。与现有的研究相比, 本文微成型效率可提高 10 倍以上^[8-9]。这验证了本文微拱形成型方法的有效性。随着 PMMA 材料不断往微沟槽中心空间堆积, 工件会因材料缺失而下凹, 导致部分拱形区域在模芯微沟槽宽度以外。

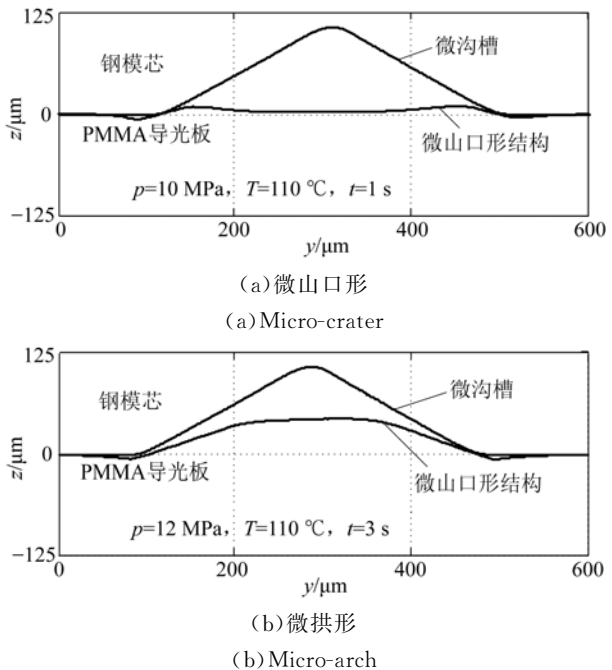


图 10 模芯微沟槽和成型微拱形的检测轮廓

Fig. 10 Profiles of microgroove and formed micro-arch for die core

6.5 微点阵和微拱形阵列形貌特征及形状误差分析

图 11 为微点阵和微拱形阵列的检测形貌。可以看到, 丝网印刷的 2D 微点阵高约 $8.2 \mu\text{m}$, 其表

面不规则,无法进行微光学性能优化。相比之下,热压成型的微拱形阵列空间平均高为 $49.5 \mu\text{m}$,是微点阵的 6 倍多,且边角整齐,表面光滑,为 3D 结构,可以对微光学性能优化进行建模。

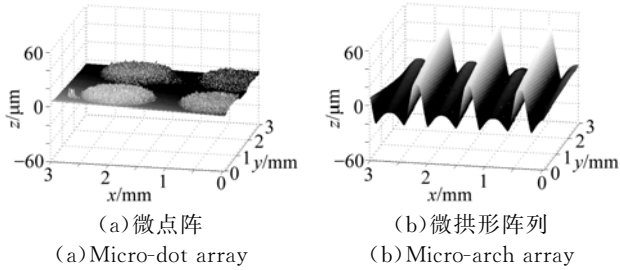


图 11 导光板微阵列的检测形貌

Fig. 11 Detected topography of microarray on LGP

图 12 为微拱形轮廓的检测值与理论值对比结果。微拱形轮廓相对中心线的张角 β 在 $-25^\circ \sim 25^\circ$ 内。检测结果显示,微拱形的平均高度 h 和平均宽度 w_d 分别为 $49.5 \mu\text{m}$ 和 $413.0 \mu\text{m}$ 。拟合的圆弧半径为 $439.7 \mu\text{m}$ 。成型误差定义为圆弧半径方向的径向误差,其检测轮廓的平均误差为 $1.2 \mu\text{m}$ 。因此,该方法可以实现微拱形透镜阵列精密成型加工。

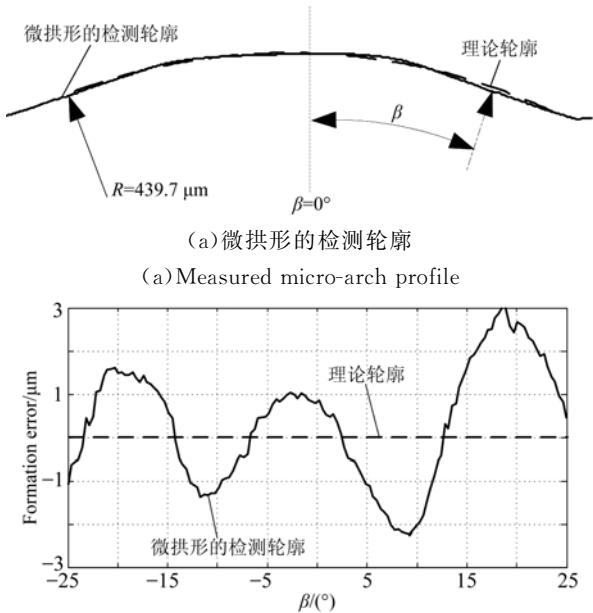


图 12 微拱形轮廓的成型误差

Fig. 12 Formation error of micro-arch profiles

6.6 LED 导光板的实际出光性能分析

图 13 为市面上常用的丝网印刷的微点阵和

新开发的微拱形阵列制备的 LED 照明效果图。照度检测结果如表 1 和表 2 所示。结果显示,新开发的微拱形透镜阵列导光板的出光照度比丝网印刷微点阵导光板提高了 21%,出光均匀度提高了 27%。但是,微山口形透镜阵列的出光均匀度却降低了 26%。这表明,新开发的微拱形透镜阵列导光板在 LED 照明领域具有潜在的市场空间。

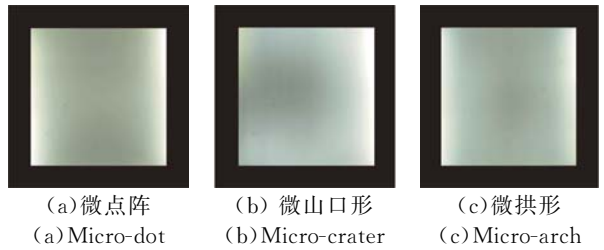


图 13 LED 照明效果

Fig. 13 LED lighting effects

表 1 几种不同形状导光板出光照度 I

Tab. 1 Irradiance intensities of different LGPs (lx)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
微点阵	12	8	14	14	8	14	17	7	14
微山口形	20	15	16	17	8	9	23	13	11
微拱形	16	15	14	18	11	12	22	13	12

表 2 几种不同导光板的光照度和照度均匀度检测结果

Tab. 2 Detection results of irradiance intensities and uniformities for different LGPs

	I_{\min}/lx	I/lx	ψ
微点阵	7.24	12.09	0.60
微山口形	8.16	14.66	0.56
微拱形	11.18	14.68	0.76

7 结 论

对于微拱形阵列结构导光板,不等间距阵列比等间距阵列有更好的出光性能和更少的微阵列数。而且,光照度在微阵列高度为 $50 \mu\text{m}$ 时接近最大。因此,微光学精准设计可用于改善 LED 的照明性能。与目前热压微成型工艺参数相比,本文在较小压力 12 MPa 和较低温度 110°C 下,利用模芯表面微沟槽阵列空间,可在 3 s 内快速热压出高精度的微拱形透镜阵列。能够使微成型效率提高 10 倍以上,可解决微阵列精密成型加工的效率低和能耗大等问题。市面标准的导光板表面

被热压微成型出3D微拱形透镜阵列后,比丝网印刷的2D等间距微点阵结构导光板照度提高21%,均匀度提高27%。这表明高效率高精度的

热压微成型工艺可能替代有环保问题的丝网印刷工艺,采用该工艺可使照明产业开发出高质量的导光板产品。

参考文献:

- [1] KIM Y C. LGP pattern design with single LED light source [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(3):1341-1345.
- [2] MARTINI I, KAMP M, FISCHER F, *et al.*. Fabrication of quantum point contacts and quantum dots by imprint lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2001, 57(5):397-403.
- [3] KC B, FARUK O, AGNELLI J A M, *et al.*. Sisal-glass fiber hybrid biocomposite; Optimization of injection molding parameters using Taguchi method for reducing shrinkage [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 83: 152-159.
- [4] YAO D G. Injection molding high aspect ratio microfeatures [J]. *Journal of Injection Molding Technology*, 2002, 6(1):11-17.
- [5] BECKER H, HEIM U. Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures [J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2000, 83(1-3):130-135.
- [6] KASMAN Ş. Impact of parameters on the process response: a taguchi orthogonal analysis for laser engraving [J]. *Measurement*, 2013, 8(46):2577-2584.
- [7] 贺永,傅建中,陈子辰,等. 微热压印过程中聚合物流动形貌的研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2):270-278.
HE Y, FU J ZH, CHEN Z CH, *et al.*. Study on polymer flow profile in micro hot embossing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 270-278. (in Chinese)
- [8] TOOSI S F, MORADI S, EBRAHIMI M, *et al.*. Microfabrication of polymeric surfaces with extreme wettability using hot embossing [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 378:426-434.
- [9] WU C H, LU C H. Fabrication of an LCD light guide plate using closed-die hot embossing [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2008, 18(3):285-288.
- [10] 项震,侯晶,聂传继,等. 化学刻蚀的光学元件面形修复[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7):997-1001.
XIANG ZH, HOU J, NIE CH J, *et al.*. Form error of optical surface repaired by wet-etch figuring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 997-1001. (in Chinese)
- [11] 李晓舟,于化东,许金凯,等. 微切削加工中切削力的理论与实验[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 1086-1092.
LI X ZH, YU H D, XU J K, *et al.*. Theory and experiments of cutting forces in micro-cutting process [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1086-1092. (in Chinese)
- [12] 陈明君,陈妮,何宁,等. 微铣削加工机理研究新进展[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(5):161-172.
CHEN M J, CHEN N, HE N, *et al.*. The research progress of micromilling in machining mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(5):161-172. (in Chinese)
- [13] XIE J, LUO M J, HE J L, *et al.*. Micro-grinding of micro-groove array on tool rake surface for dry cutting of Titanium alloy [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(10):1845-1852.
- [14] KASZTELANIC R, KUJAWA I, OTTEVAERE H, *et al.*. Optical quality study of refractive lenses made out of oxide glass using hot embossing [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 73:212-218.

作者简介:



谢晋(1963—),男,山西榆次人,博士,教授,博士生导师,2002年于日本北见工业大学获得博士学位,2007年于日本北见工业大学微纳米加工学研究室任访问研究员,主要从事磨削加工、精密加工和微细加工方面的研究。
E-mail:jinxie@scut.edu.cn



江宇宁(1993—),男,广东广州人,硕士研究生,主要从事精密及超精密加工、机械制造及自动化方面的研究。
E-mail:little_pigeon@163.com

(本栏目编辑:李自乐)