

# 光盘纹扩散板的微结构设计制备

刘晓静<sup>1</sup>, 徐智谋<sup>1\*</sup>, 宗国平<sup>2</sup>, 王先义<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup>湖北申安亚明照明科技有限公司, 湖北 天门 431728

**摘要** 基于 LightTools 软件分析了光在光盘纹(CD 纹)微结构扩散板中的传输过程,采用注塑成型制备工艺进行实测验证,研究扩散板表面的 CD 纹微结构对光提取效率的影响。通过理论研究、模拟仿真和实验对比,对扩散板表面微结构进行建模和大规模分布式光线追迹。结果表明:在 80 mm×80 mm 照明面积范围内,相对于无微结构扩散板,CD 纹微结构扩散板的光流明效率有明显提高;当线宽为 200 μm 时,光流明效率提升最多,提高了 13.52%。根据最优模拟尺寸制备出由若干同心圆环组成的 CD 纹微结构扩散板,以 LED 筒灯为实验灯具,用积分球测量使用微结构扩散板、一般扩散板和不使用扩散板的灯具的总流明输出,得到 CD 纹微结构扩散板的透光率达 90.6%,比一般扩散板的透光率提高了 8.8%的结论。

**关键词** 光学设计; 透光性能; LightTools 仿真; 注塑成型

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.212201

## Microstructure Design and Preparation of CD Pattern Diffuser

Liu Xiaojing<sup>1</sup>, Xu Zhimou<sup>1\*</sup>, Zong Guoping<sup>2</sup>, Wang Xianyi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>2</sup> Hubei Shen'an Yaming Lighting Technology Co., Ltd., Tianmen, Hubei 431728, China

**Abstract** Based on the optical analysis software of LightTools, the transmitting processing of light in CD-pattern microstructure diffuser is analyzed. The injection molding process is used to verify the effect of this model. The effect of CD pattern microstructure on the light extraction efficiency is studied. Through theoretical research, simulation, and experimental comparison, the surface microstructure of the diffuser is modeled and the ray tracing is carried out on a large scale. The results show that, in the 80 mm×80 mm illumination area, the optical lumen efficiency of the CD pattern microstructure diffuser is obviously improved compared with that of the non-microstructure diffuser, and the line width of 200 μm can increase the optical lumen efficiency by 13.52%. According to the optimal simulation size, a CD pattern microstructure diffuser composed of several concentric rings is prepared, and an 8-inch LED downlight is used as the test luminaire. The total lumen output of the microstructure diffuser, general diffuser, and luminaire without the diffuser is measured by the integrating sphere. The results show that the CD-pattern micro-diffuser has a transmittance of 90.6%, and its light transmittance is 8.8% higher than that of the general diffuser.

**Key words** optical design; light transmittance; LightTools simulation; injection molding

**OCIS codes** 220.4000; 290.1990; 230.1980; 080.2205

## 1 引言

基于光品质要求,人们对具有高出光效率的发光二极管(LED)照明光源与灯具提出了更高的期

望<sup>[1-4]</sup>,平衡光品质与高出光效率是研发新型 LED 照明光源和灯具的关键。

微结构扩散板表面的微凹凸结构<sup>[5]</sup>使光线在经过时发生不同方向的偏转,从而对光进行均匀扩散。

收稿日期: 2019-04-03; 修回日期: 2019-04-25; 录用日期: 2019-05-06

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0403401)、国家 863 计划(2015AA043302)

\* E-mail: xuzhimou@mail.hust.edu.cn

调节扩散板表面微结构的形状和排布方式,可以使扩散板具有不同的透光率和均匀度<sup>[6-8]</sup>。随着微光学和微压印技术的发展,近年来相关研究的重点日益偏向球形和V形槽阵列结构的制造和加工,较少有关于微结构几何形状等结构参数对扩散板光学性能影响的报道,研究成果显示出极大的局限性<sup>[9]</sup>。

光盘纹(CD纹)的纹理结构由若干同心圆环组成,每个圆环的线宽相同,每两个相邻圆环之间有一定的线距,是一种类似CD光盘纹路效果的纹理,通过使用精密CD纹机去除金属和无机材料的表面材料而获得。采用光刻、电铸等工艺可在钢材模具上制作CD纹微结构,然后使用注塑成型压印模具将其制备在扩散板表面,就可以改善扩散板的透光性能<sup>[10-14]</sup>。

## 2 模拟仿真与分析

### 2.1 光线追迹仿真

LightTools是一款具有光学精度的三维光学系统建模软件<sup>[15]</sup>,通过引入蒙特卡罗方法<sup>[16]</sup>进行设计与模拟,可以预测照明效果。同时,借助该软件

还可以对光源表面所需数目的光线进行追迹,并且追迹的光线方向可指向空间中的任意角度,在指定的接收器上收集这些光线发出的能量,然后进行统计分析,并且将分析结果用图表显示出来,就可以模拟、分析光束在介质中的传输。

基于LightTools光线追迹,主要从照明光功率密度及光流明效率两个方面对仿真结果进行分析。照明光功率密度为单位面积上的光功率,单位为 $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;光流明效率 $R$ 指照明面接收总能量 $E_{\text{receiver}}$ 与光源发光总能量 $E_{\text{source}}$ 之比,即 $R = E_{\text{receiver}} / E_{\text{source}}$ 。依照优化设计的结果,在LightTools中建立如图1所示的LED照明系统追迹模型。图1(a)为填充轮廓图,图1(b)为网线轮廓图。

图1中灯罩尺寸为:灯罩外半径为22.5 mm,PC扩散板厚度为1.5 mm。光源到PC扩散板的直线距离为30 mm。

在LightTools中建立如图2所示的CD纹模型图,其中,图2(a)为灯罩整体模型,图2(b)为扩散板表面

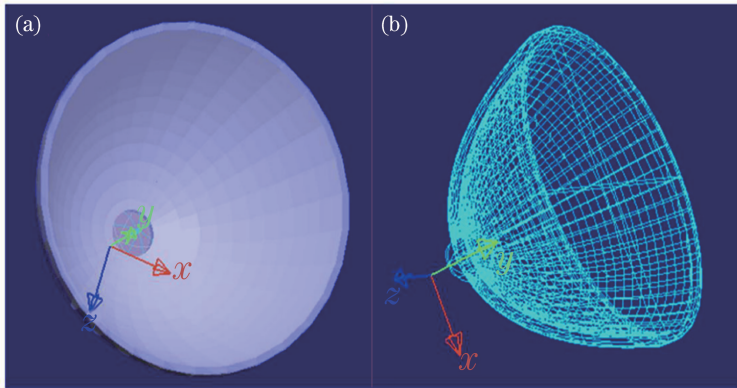


图1 LightTools中灯罩轮廓设计图。(a)填充轮廓图;(b)网线轮廓图

Fig. 1 Outline design of lampshade in LightTools. (a) Fill outline; (b) network cable outline

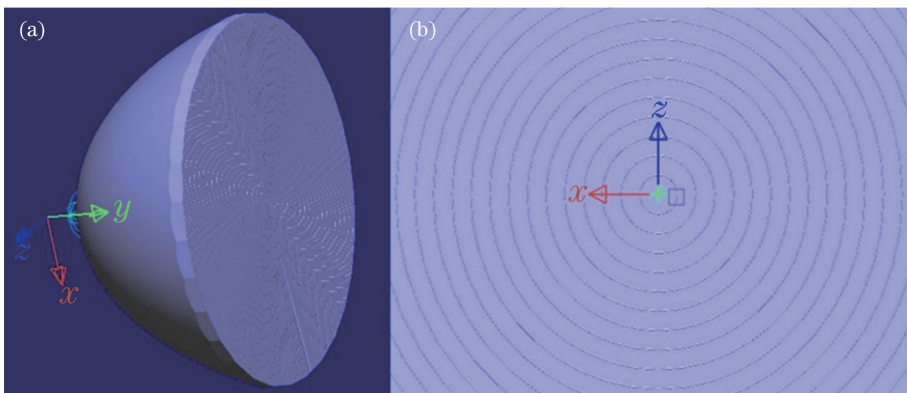


图2 CD纹模型图。(a)灯罩整体模型;(b)扩散板表面

Fig. 2 CD pattern model. (a) Overall model of lampshade; (b) diffuser surface

CD纹是由若干个同心圆环组成的微结构扩散板,以下主要探讨同心圆阵列分布的CD纹纹理间线宽范围对光透过率的影响。为选出合适的CD纹纹理尺寸,模拟设计了3组仿真对比实验,线宽分别设置为100,200,300  $\mu\text{m}$ ,如图3所示,其中,图3(a)中心的线宽为100  $\mu\text{m}$ ,外围的线宽为200  $\mu\text{m}$ ,图3(b)中的线宽为300  $\mu\text{m}$ 。

为了使仿真结果更接近实际情况,LightTools 中的主要参数根据表1数据进行设置。LightTools

中特有的分布式运算功能可对照明系统进行大规模的光线追迹,有效提高了运算和仿真效率。

在对光学模型进行大量光线追迹模拟后,可在目标接收器平面上形成照明光斑。为了对比LED在加入微结构CD纹前后照明光斑的差异,分别对无微结构的PC扩散板和加入CD纹的PC扩散板的光斑分布进行仿真。PC扩散板灯具在照明平面上的光线追迹如图4所示,其中,图4(a)为LED面光源的光源发射图,图4(b)为添加了接收器的光线图。

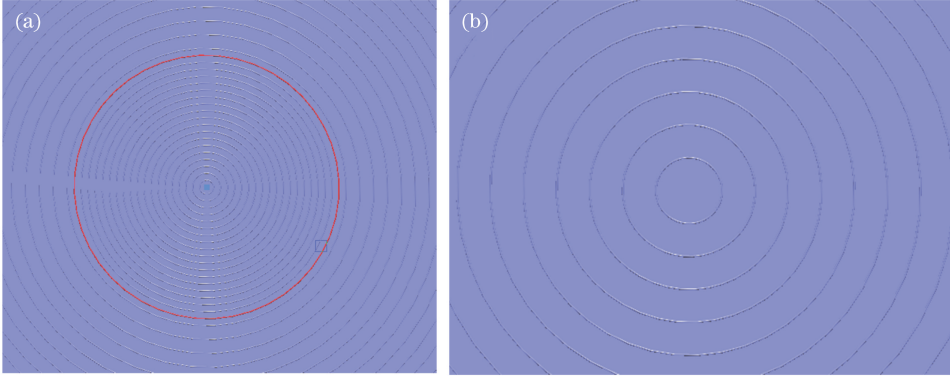


图3 CD纹尺寸对比。(a)中心线宽100  $\mu\text{m}$ ,外围线宽200  $\mu\text{m}$ ; (b)线宽300  $\mu\text{m}$

Fig. 3 Comparison of CD pattern sizes. (a) Center line width is 100  $\mu\text{m}$ , and peripheral line width is 200  $\mu\text{m}$ ; (b) line width is 300  $\mu\text{m}$

表1 模型主要参数设置

Table 1 Main parameter settings of the model

Parameter	Number of ray tracing	Illumination area / (mm $\times$ mm)	Number of mesh	Optical material	Reflectivity of reflecting element / %
Content	$5 \times 10^5$	80 $\times$ 80	21 $\times$ 21	Polycarbonate	85

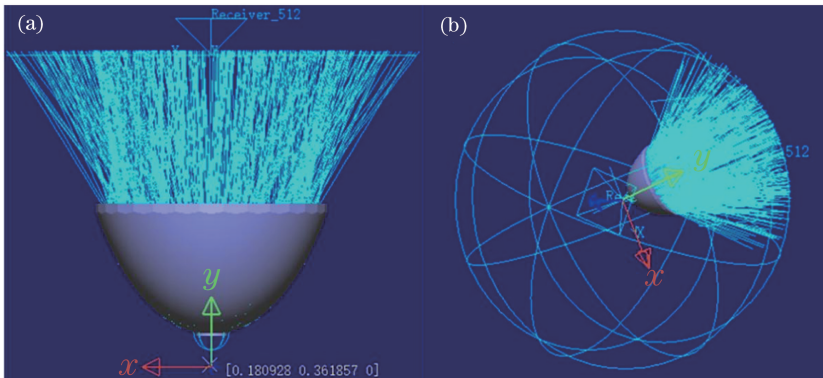


图4 LED筒灯照明系统的光线追迹仿真。(a)单独光源轨迹;(b)添加接收器后的轨迹

Fig. 4 Ray tracing simulation of LED downlight lighting system. (a) Ray tracing of single light source; (b) ray tracing with receiver

### 2.2 模拟结果分析

经过大规模光线追迹后,LightTools 仿真分析结果如图5~8所示。图5~8分别为扩散板表面无微结构,以及CD纹扩散板线宽分别为100,200,300  $\mu\text{m}$

时的仿真结果。其中,图5(a)中左侧部分为色度条,右侧部分为光功率密度分布图,X、Y分别代表照射的范围,单位为mm;图5(b)为照度显示曲线,图中P表示与接收面中心的距离,单位为mm。

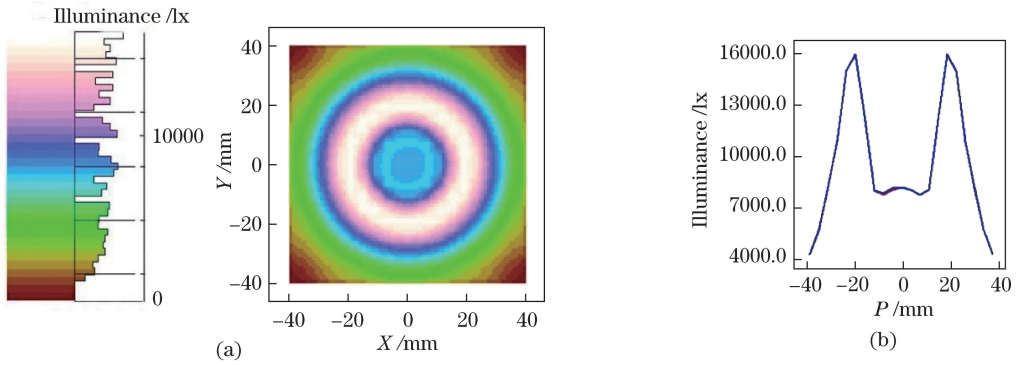


图 5 光线追迹仿真结果。(a)光功率密度分布图;(b)照度显示曲线

Fig. 5 Simulation results of ray tracing. (a) Light power density distribution; (b) illumination display curve

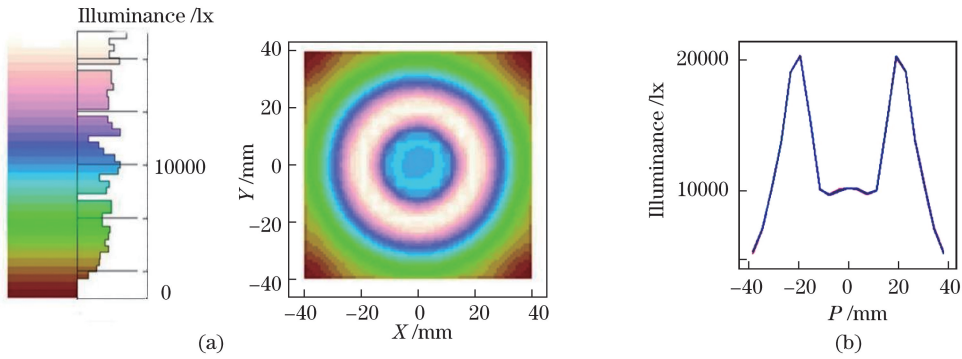


图 6 线宽为 100 μm 时的光线追迹仿真结果。(a)光功率密度分布图;(b)照度显示曲线

Fig. 6 Simulation results of ray tracing at line width of 100 μm. (a) Light power density distribution; (b) illumination display curve

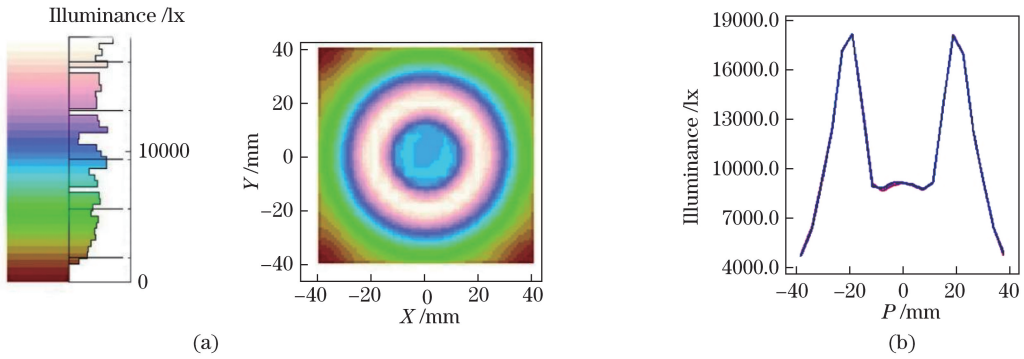


图 7 线宽为 200 μm 时的光线追迹仿真结果。(a)光功率密度分布图;(b)照度显示曲线

Fig. 7 Simulation results of ray tracing at line width of 200 μm. (a) Light power density distribution; (b) illumination display curve

从图 5(a)、图 6(a)、图 7(a)、图 8(a) 左侧的能量条可以发现,光斑中心的光照均匀分散,带有微结构的扩散板亮度范围比无微结构的扩散板的亮度范围大。图 5(b)、图 6(b)、图 7(b)、图 8(b) 中的曲线中心部分是凹下去的,两边有两个突起,根据单位辐照度曲线可计算接收范围内的光照度值。

对仿真对象进行编号: Value1 代表无微结构的扩散板, Value2、Value3、Value4 分别代表 CD 纹线宽为 100, 200, 300 μm 的微结构扩散板。在距离扩

散板 60 mm、照明面积为 80 mm×80 mm 的范围内设置总流明值为 100 lm, 如表 2 所示, 无微结构扩散板输出的流明值为 51.322 lm, 具有表面 CD 纹微结构、线宽分别为 100, 200, 300 μm 的扩散板输出的流明值分别为 55.228, 64.844, 60.456 lm。当总光功率设为 1 W 时, Value1 输出的光功率密度为 0.51322 W, Value2、Value3、Value4 输出的光功率密度分别为 0.55228, 0.64844, 0.60456 W。因此, 无微结构扩散板的光提取效率为 51.32%, 具有 CD 纹



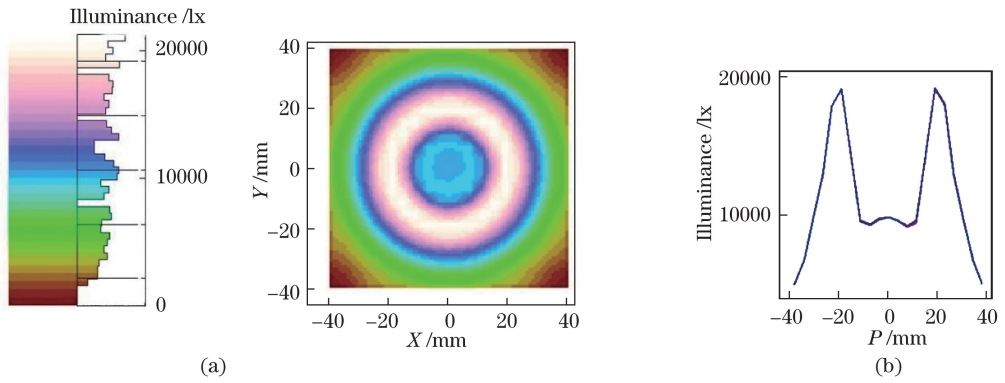


图 8 线宽为 300  $\mu\text{m}$  时的光线追迹仿真结果。(a)光功率密度分布图;(b)照度显示曲线

Fig. 8 Simulation results of ray tracing at a line width of 300  $\mu\text{m}$ . (a) Light power density distribution; (b) illumination display curve

表 2 LightTools 仿真结果

Table 2 Simulation results of LightTools

Item	Number of samples	Total power /W	Total luminous flux /lm	Incident power /W	Incident luminous flux /lm
Value1	270928	1	100	0.51322	51.322
Value2	212082	1	100	0.55228	55.228
Value3	247367	1	100	0.64844	64.844
Value4	241807	1	100	0.60456	60.456

微结构的扩散板的最高光提取效率为 64.84%，相比无微结构扩散板，其光提取效率提高 13.52%，光流明效率提高 13.52%，且当表面 CD 纹微结构的线宽设置为 200  $\mu\text{m}$  时仿真效果最好。

### 3 制备工艺与性能测试

#### 3.1 制备工艺

##### 3.1.1 注塑成型工艺过程

注塑成型是复制聚合物材料微结构的有效手

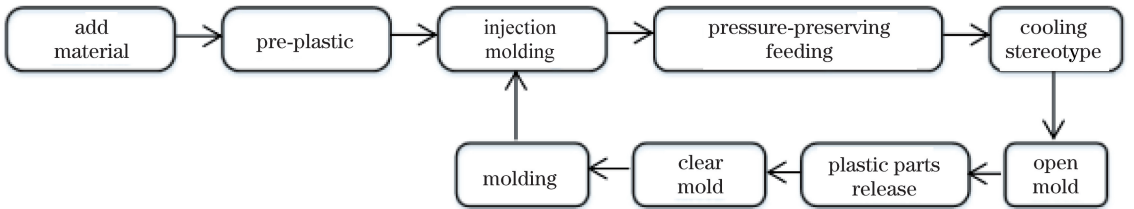


图 9 注塑成型过程

Fig. 9 Injection molding process

##### 3.1.2 LIGA 模具制作技术

LIGA (Lithographische GaVanoformung Abformung) 模具制作技术可加工三维微细结构，是光刻、电铸与模塑的组合技术，提供了一种可用于制作高精度、高深宽比微结构的方法。加工过程中，使用功率同步加速器产生 X 射线，再进行光刻，从而在光阻投影作用下形成微型结构，最后经电铸处理形成金属模具，铸模在复制后即制备出所需的塑料

段，生产速度快，效率高，操作方便。该处理是一个循环的周期过程，通常由三个阶段组成，即注射阶段、保压压实阶段、固化冷却阶段。注塑成型过程如图 9 所示。

在制备过程中，将粒、粉状塑料从注塑机的料斗送入加热的料筒，通过加热将其塑化成熔融状态，然后由螺杆压入，再通过料筒端部的喷嘴将其注入低温闭合的模具型腔，进行冷却和硬化，以保持模腔赋予的形状，移除模具后取出胶体就完成了个工作周期<sup>[17]</sup>。

产品。在 LIGA 技术微模具制造应用中，LIGA 模具制作技术工艺流程如图 10 所示，具体步骤为：

1) 同步 X-射线曝光。将形成的二维图案借助 X 射线投射到铜掩模板上，吸收体吸收 X 射线能量，进而将能量转移到光刻胶上，通过控制单点光束的强度形成三维图形。

2) 光刻显影。光刻胶经 X 射线曝光处理后，被置于显影液中进行处理，未处理的光刻胶不能溶

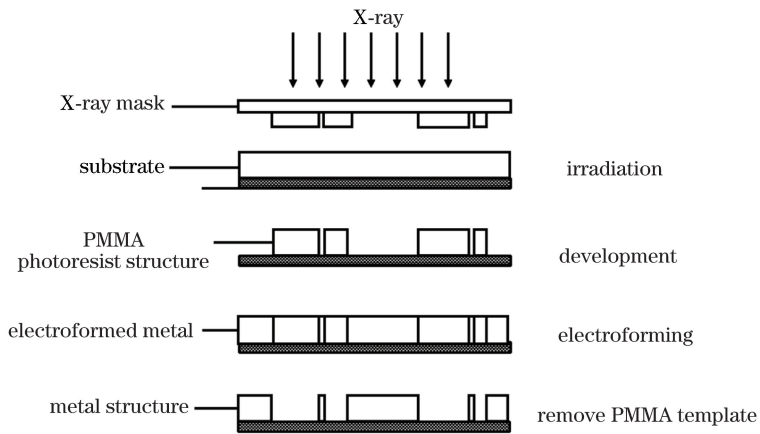


图 10 LIGA 模具制作技术工艺流程

Fig. 10 LIGA mold making technology process

解到显影液内,从而形成三维光刻胶微结构。

3)电铸制模。经显影处理后,将金属填充到三维光刻胶微结构空隙中,在电场的作用下,阳极金属通过添加电铸液来剥离电子,金属离子逐渐向阴极移动,电子附着在阴极上,金属离子沉积后形成互补金属结构。

4)注塑复制。在电铸操作后制备金属微结构,金属微结构用于注塑模具模板。采用快速注塑成型技术和模压成型技术,在注塑成型工艺后获得塑料

结构,从而降低微型模具的生产成本。

### 3.1.3 电铸工艺

随着电铸加工的不断发 展,现在人们不仅可以制造用于生产高精度产品的腔体,还能生产具有表面纹理的大型模腔。本文采用该方法制备具有 CD 纹微结构的扩散板模具<sup>[18]</sup>。

电铸设备主要由电铸槽、直流电源、加热及冷却系统、搅拌及循环过滤系统等组成,电铸的工艺过程如图 11 所示,具体步骤为:

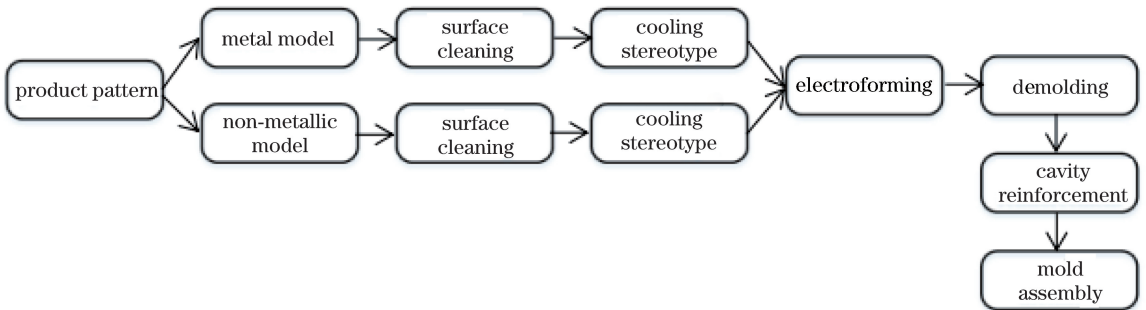


图 11 电铸模具的工艺流程图

Fig. 11 Flow chart of electroforming mold process

1)电铸产品工艺流程。依次进行预电铸处理、电铸工艺和电铸后处理。

2)电铸前处理流程。依次进行芯模选择、表面清洁、脱脂、电镀分离层、电镀导电层、水洗清洁处理。

3)电铸流程。依次进行芯模制作,复制一级、二级模具,复制三级木制模具,复制批量产模具,电铸生产,电铸部件脱模,电铸后加工,质量检验和成品储存。

## 3.2 性能测试

### 3.2.1 测试使用仪器

测试所用仪器如表 3 所示。

表 3 测试设备

Table 3 Test equipment

Test equipment No.	Equipment name	Type
1	Integrating sphere	HAAS-2000
2	Scanning electron microscope (SEM)	EM-30 PLUS
3	Surface probe type step meter	Dektak XT
4	Surface profile measuring instrument	PGI-830
5	Laser scanning confocal microscope	VK-X200K408

### 3.2.2 CD纹微结构参数测试

CD纹的微结构形状由若干同心圆环组成,呈以透板中心为圆心、均匀阵列分布的同心圆棱纹,其表面结构示意图如图12所示。

使用表面探针式台阶仪对纹理的间距进行测试

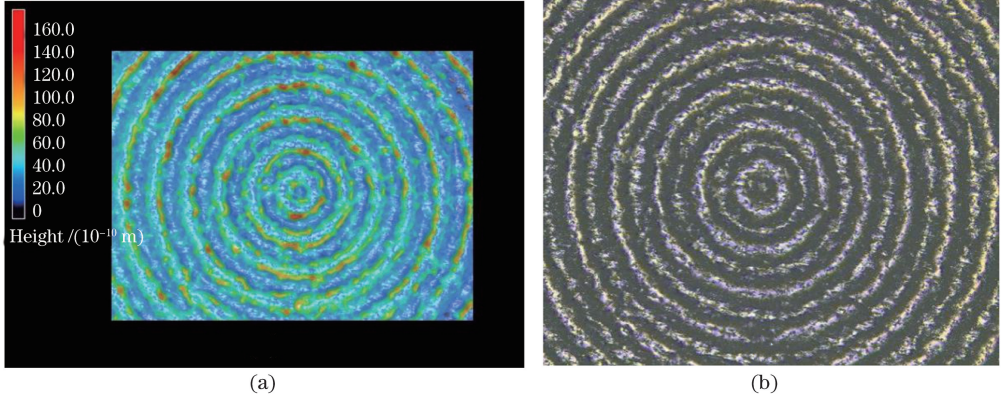


图12 CD纹微结构示意图。(a) 3D轮廓显示;(b)二维平面显示

Fig. 12 Diagrams of CD pattern microstructure. (a) 3D outline display; (b) 2D flat display

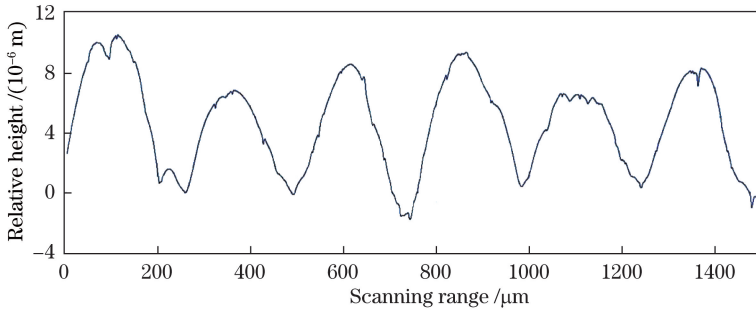


图13 直径测试示意图

Fig. 13 Diameter test schematic

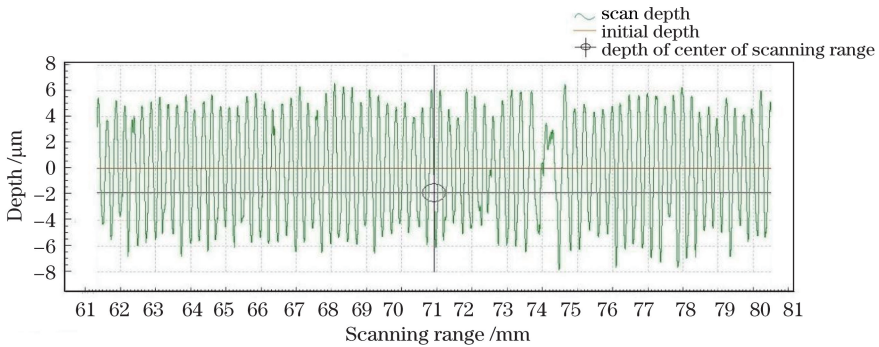


图14 深度测试示意图

Fig. 14 Depth test schematic

微结构条纹的平均直径为  $200\ \mu\text{m}$ ,高度范围为  $5\sim 10\ \mu\text{m}$ ,平均高度为  $8.0\ \mu\text{m}$ 。

制备的样板 CAD 尺寸信息为:圆板直径为  $181.5\ \text{mm}$ ,厚度为  $1.5\ \text{mm}$ ,同心圆阵列分布。

### 3.2.3 实物测试与分析

测试的 CD纹微结构扩散板和普通扩散板的实

物对比如图15所示。

使用表面综合轮廓仪对纹理的高度进行测试,扫描范围为  $20\ \text{mm}$ ,测试微结构的深度如图14所示。

物对比如图15所示。

图16是表面具有微结构扩散板的筒灯与表面是一般扩散板的筒灯的扩散效果对比图。在不影响照明装置亮度的情况下,表面具有CD纹微结构的光扩散板可以将光源发出的光散射到不同的方向,很好地改善了照明过程中光照不均匀的问题,可以



图 15 CD 纹微结构扩散板和普通扩散板对比图。(a)微结构扩散板;(b)一般扩散板;(c)无扩散板

Fig. 15 Comparison of CD pattern microstructure diffuser and ordinary diffuser. (a) Microstructure diffuser; (b) general diffuser; (c) without diffuser

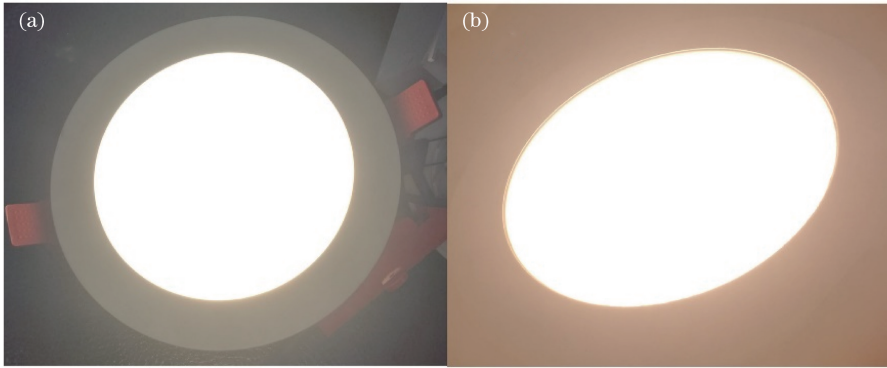


图 16 光扩散板扩散效果图。(a) CD 纹微结构扩散板;(b)一般扩散板

Fig. 16 Diffusion effect diagrams of light diffusers. (a) CD pattern microstructure diffuser; (b) general diffuser

消除眩光,通过改变扩散板的形状改善了灯具的光学性能。使用积分球对微结构扩光板、一般扩光板进行透光率测试,得到如表 4 所示的数据。

对比分析表 4 的数据可以看出:与无扩散板的筒灯相比,表面具有微结构扩散板的筒灯会损失一部分光效,但是会使光线分布更加均匀。相对于普通的扩散板,CD 纹形状的微结构可以将扩散板的透光率提高

8.8%。这主要是由于表面微结构的存在可以避免或减少光扩散剂的添加,从而避免添加光扩散剂而引起的透光率的降低。同时,在加工过程中,受制备工艺的影响,CD 纹表面结构无法达到完全光滑的效果,经综合表面轮廓仪检测发现,制备的 CD 纹扩散板表面有一定的粗糙度,这会对光的折反射产生一定的影响。因此,实测的光提取效率与仿真结果有一定的差异。

表 4 微结构扩散板与一般扩散板的测试数据

Table 4 Test data of microstructure diffuser and general diffuser

Structure	Luminous flux /lm	Light effect /( $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ )	Color temperature /K	Relative transmittance /%
Microstructure diffuser	2009.8	95.99	3912	90.6
General diffuser	1815.9	86.75	3891	81.8
No diffuser	2219.7	105.95	3947	100

## 4 结 论

运用 LightTools 光线追迹仿真,对无微结构的扩散板和表面具有 CD 纹微结构的扩散板的光提取效率进行了模拟比较,在距离灯具扩散板 60 mm、照明面积为 80 mm×80 mm 的范围内,总光通量设为 100 lm,无微结构扩散板的透光率为 51.32%,而表面有 CD 纹微结构的扩散板的透光率为 64.84%,

较前者提高 13.52%,这说明 CD 纹微结构可提高扩散板的光提取效率。

通过注塑成型制备工艺对模拟结果进行验证,测试分析在扩散板直径为 181.5 mm、厚度为 1.5 mm 的筒灯模型下,线宽范围为 200  $\mu\text{m}$  的同心圆阵列分布的 CD 纹对光透过率的影响,结果显示,其光提取效率比普通无微结构扩散板提高了 8.8%。



## 参 考 文 献

- [1] Narukawa Y. White-light LEDs [J]. *Optics and Photonics News*, 2004, 15(4): 24-29.
- [2] Lee H W, Lin B S. Improvement of illumination uniformity for LED flat panel light by using micro-secondary lens array[J]. *Optics Express*, 2012, 20(S6): A788-A798.
- [3] Tsai M D, Chen J J, Huang K L. A design of LED panel lamp for indoor illumination [M] // Juang J, Huang Y C. *Intelligent technologies and engineering systems. Lecture notes in electrical engineering*. New York, NY: Springer, 2013, 234: 487-493.
- [4] Tsuei C H, Pen J W, Sun W S. Simulating the illuminance and the efficiency of the LED and fluorescent lights used in indoor lighting design[J]. *Optics Express*, 2008, 16(23): 18692-18701.
- [5] Liang D J, Lai L P, Chen C Y, *et al.* Research of grazing incidence diffuser with microstructure of double-sided triangular prism arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0622005.  
梁德娟, 赖丽萍, 陈春玉, 等. 掠射式双面三棱柱阵列微结构扩散板的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0622005.
- [6] Wang H J. Molding method and performance of multi-layer microstructure diffusion plate for LED lighting fixtures [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014: 44-57.  
王海军. 用于LED照明灯具的多层微结构扩散板的成型方法与性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2014: 44-57.
- [7] He X X, Wu D M, Zheng X T. Effect of microstructure of light diffuser plate on uniformity and transmittance [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(2): 153-157.  
何晓祥, 吴大鸣, 郑秀婷. 扩散板表面微结构对均匀度与透光率的影响[J]. *液晶与显示*, 2012, 27(2): 153-157.
- [8] Wan Y J, Liu J, Lin H B, *et al.* Fresnel lens of freeform surface for realizing uniform light distribution on general LED light sources[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 062201.  
万运佳, 刘杰, 林浩博, 等. 一般LED光源均匀配光的自由曲面菲涅耳透镜[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 062201.
- [9] Shen S, Zhou L, Wei G J, *et al.* Design of distributed micro-area micro/nano-imprinting lithographic system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(4): 807-812.  
申溯, 周雷, 魏国军, 等. 微区微纳米压印技术及设备[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4): 807-812.
- [10] Ho J R, Shih T K, Cheng J W J, *et al.* A novel method for fabrication of self-aligned double microlens arrays [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 135(2): 465-471.
- [11] Huang T C, Ciou J R, Huang P H, *et al.* Fast fabrication of integrated surface-relief and particle-diffusing plastic diffuser by use of a hybrid extrusion roller embossing process[J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 440-447.
- [12] Liu S J, Huang Y C. Manufacture of dual-side surface-relief diffusers with various cross angles using ultrasonic embossing technique[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 18083-18092.
- [13] Hung S Y, Chen S N, Lin C P, *et al.* The robust design for gapless microlens array fabrication using the incomplete developing and thermal reflow process [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2007, 49(1): 23-29.
- [14] Chen G X, Chen J X, Cai Y A. Micromachining technology application in micro-mold making [J]. *China Plant Engineering*, 2017(14): 168-169.  
陈国兴, 陈吉祥, 蔡耀安. 在微模具制作中的微机械加工技术应用[J]. *中国设备工程*, 2017(14): 168-169.
- [15] Wang Y T, Zhu M, Zhao G F, *et al.* Research on anti-dazzling technology of optical films based on lighttools[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009(11): 175-177.  
王玉婷, 朱明, 赵桂范, 等. 基于LightTools光学薄膜防眩目研究[J]. *机械设计与制造*, 2009(11): 175-177.
- [16] Sun W, Ying J P, Li J, *et al.* Monte Carlo method study of light propagation in tissues[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(1): 97-101.  
孙威, 应金品, 李江, 等. 用蒙特卡罗方法研究生物组织中的光分布[J]. *光学学报*, 1994, 14(1): 97-101.
- [17] Guo L J. Nanoimprint lithography: methods and material requirements [J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(4): 495-513.
- [18] Schertler D J, George N. Uniform scattering patterns from grating-diffuser cascades for display applications [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(2): 291-303.