

文章编号 1004-924X(2007)07-1032-06

LED 阵列式紫外固化光源光学系统设计

许文海¹, 赵 欢¹, 芦永军²

(1. 大连海事大学, 辽宁 大连 116026; 2. 大连民族学院, 辽宁 大连 116600)

摘要:设计了一种新型的 LED 阵列式紫外固化光源系统, 该系统主要包括多路可控恒流源, 紫外 LED 空间阵列及光学系统等, 其中紫外 LED 空间阵列结构提高了光源的辐照度和均匀性。在分析光源结构的基础上, 对其光学系统进行了设计, 给出了 LED 空间阵列光学系统的设计方法和设计实例, 并利用 Light Tools 光学仿真软件对其进行了模拟。结果表明: 采用该光学设计方法得到的空间阵列辐照系统, 其紫外辐照度可达 200 mW/cm^2 , 辐照面上光强分布均匀稳定, 能够满足紫外光固化过程对光源的指标要求。

关键词: 紫外光固化; LED 空间阵列; 光学设计; Light Tools

中图分类号: TN23; O434. 24 **文献标识码:** A

Design of an optical system for UV curing source with LED array

XU Wen-hai¹, ZHAO Huan¹, LU Yong-jun²

(1. *Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*
2. *Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China*)

Abstract: A novel system mainly consisting of multipath controllable constant current source, UV LED spatial array and optical system for UV curing source with LED array was presented. Among them, UV LED spatial array is used to increase the radiation and uniformity of the source. Based on analyzing the UV curing source structure, an optical system was designed. The design method and several design cases, and simulations for optical system with the Light Tools software were also presented. Experimental results show that UV irradiance of the LED spatial array source designed by this method can reach 200 mW/cm^2 , and the radiation in the radiating area maintains even and stable, which can meet the needs for source in UV curing process.

Key words: UV curing; LED spatial array; optical design; Light Tools

1 引 言

辐射固化指利用辐射(如紫外光(UV)或电子束(EB))照射涂层, 产生化学反应, 瞬间将此材

料从液态低聚物变成固态产物的过程。其中, 紫外光固化是目前最流行的一种辐射固化技术, 占整个辐射固化市场的 95%, 已广泛应用于印刷、包装、广告、建材、装潢、电子、家电、光纤、汽车等行业^[1]。据中国感光学会辐射固化委员会统计,

2005年我国已经成为仅次于美国和日本的辐射固化原材料及产品的生产应用大国。

紫外光固化系统中,紫外辐照光源系统是专用辐射固化装置的重要组成部分,其光学技术指标(如辐照度,聚光能力,均匀性,光斑尺寸等)直接影响到固化的最终效果,因此,光学总体设计是实现高均匀性、高稳定性、高辐照强度的紫外固化光源系统的关键。本文提出了一种应用大功率紫外发光二极管(UV LED)空间阵列^[2-5]作为光源的新型固化光源系统,着重介绍了LED阵列光学系统设计方法。光学软件模拟的结果表明,采用该方法得到的空间阵列辐照光学系统可实现较高的紫外辐照度和均匀性,有效地提高了紫外光源系统的整体性能。

2 LED阵列式紫外固化光源系统

紫外固化光源需要在瞬间提供均匀的高强度紫外光,在相同紫外光剂量的固化条件下,高辐照度的紫外固化光源可增加固化速度和深度^[6]。同时对不同的应用现场,需要光源系统具备辐照面光功率密度灵活可调的能力。由于单管LED辐射功率一般很难满足实用要求,为达到足够的辐射强度保证固化瞬间完成,采用了空间LED阵列分布的光学结构设计实现全部LED在辐照面上的光功率累加,控制LED的数量可以较准确地达到辐照面光功率密度要求,而合理计算单管聚焦系统及其空间排布结构尺寸可以有效地对辐照光斑尺寸及均匀性等光束质量进行控制;另外,灵活调节阵列中各LED驱动电流可以控制辐照面(线)上各处的光功率密度,这也是该阵列结构的又一大优势,增强了系统的灵活性和适用性。系统结构如图1所示。

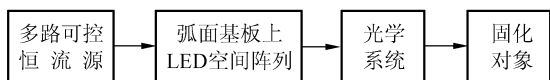


图1 LED阵列式紫外固化光源系统

Fig.1 UV curing source system with LED array

系统中,多个LED沿弧面基板排布成空间阵列。采用以单片机为主控单元^[7-8]的多路可控恒流源作为LED阵列的驱动电路,可实现调节弧面基板上某一组LED的驱动电流^[9],从而控制光

源的辐照光强。多个LED发出的紫外光经合理的光学系统,得到一条高辐照度的均匀光带用于固化加工。系统装置另有紫外光防护罩用以提高使用安全性等,在此不再赘述。

3 光学系统设计

本设计的UV LED波长在360~380 nm范围,集中在世界常用紫外固化波长365 nm波段,其发光面尺寸为1 mm²,发散角为±30°左右,在500 mA电流驱动下正常工作时,辐射光功率为85 mW。

对于整个系统而言,LED阵列驱动电路确保LED稳定发光后,光学系统设计的好坏将决定紫外固化光源的性能。

3.1 单LED光学系统

单个LED发出的发散光,经光学准直系统^[10-11]进行会聚,得到近似平行光。为了最大限度地聚集辐射能量,采用了与LED发光特性匹配的大数值孔径两片式准直系统。光学原理如图2所示。

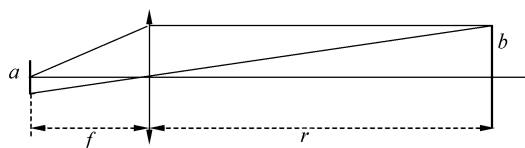


图2 单LED光学系统原理图

Fig.2 Illustration of single LED's optical system

垂轴放大率定义为像的大小与物体的大小之比,可表示为 $\beta = \frac{b}{a} \approx \frac{r}{f}$ 。其中 a 为LED发光芯片长度, b 为像方光斑尺寸, f 为聚光系统有效焦距, r 为像距。

垂轴放大率决定了特定工作距离要求下的辐射光斑尺寸,同时决定了辐照面元上的紫外光功率密度。

数值孔径的大小一方面体现了LED聚光系统的聚光能力,同时还限制了出射光束的准直性和光斑大小。数值孔径大的系统聚光能力强,但作为较远距离使用的准直系统而言,光束发散角越大,单位面积上的紫外光功率越低。所以,需要通过优化计算来确定高聚光能力与高紫外辐照度

之间的最佳配比,并针对光源的实际要求,重点对球差进行控制和优化。通过 Zemax 光学设计软件设计出系统的数值孔径 NA 为 0.5,光束发散角为 $\pm 2^\circ$ 左右。

考虑到绝大多数光学玻璃在该紫外波段有较强的吸收,所以聚光准直系统的材料采用紫外通用的高透过率石英玻璃^[12]。同时,为减小菲涅尔反射损耗,光学系统各面均镀制了光学增透膜,保证光学系统的整体透过率达到 98% 以上。

3.2 LED 空间阵列光学系统

依据现场对工作距离、辐照面紫外辐照度及光强分布均匀性等实际需要,计算了光学系统中 LED 空间分布的具体结构参数,其中主要包括阵列中 LED 数量,弧面基板半径,边缘 LED 位置,光源工作距离等。

设单个 LED 正常发光的最大辐照度为 L_A , 固化材料实际需要的紫外辐照度为 L_B , 则所需的 LED 数量为 N :

$$N \geq \left[\frac{L_B}{L_A} \right] \text{ (进位取整)}, \quad (1)$$

如图 3 所示,设 d 为 LED 与相应准直系统所成单元的直径大小,即单管 LED 出瞳尺寸。它近

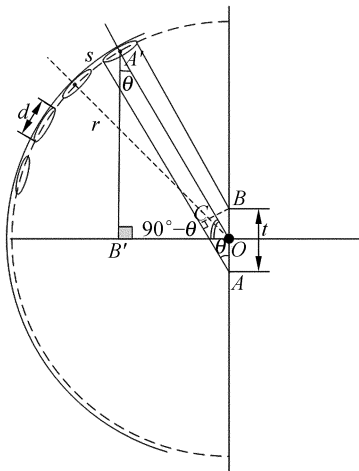


图 3 LED 空间阵列光学系统原理图

Fig. 3 Illustration of LED spatial array's optical system

似等于 3.1 中单个 LED 经准直系统会聚所得的光束直径。

$$\begin{cases} \sin \theta \approx \frac{d}{t}, \theta \text{ 为 LED 相对于辐照中心的偏转角} \\ t \geq \text{LED 出瞳的光斑直径 } d, \end{cases} \quad (2)$$

其中, t 为 LED 非垂直照射于圆心处的光斑

尺寸。

由 $\triangle ABC$ 与 $\triangle A'OB'$ 两个三角形的几何关系可以得到

$$\begin{cases} l = \frac{90^\circ - \theta}{180^\circ} \pi r \\ l \geq \left[\frac{N}{2} \right] \cdot \frac{d+s}{2}, \end{cases} \quad (3)$$

其中, l 为弧面基板半圆心角对应的弧长; r 为弧面基板的半径,它的大小决定了光源的工作距离,并限制了 LED 阵列单元空间排布的数量; s 代表了包含机械加工冗余量的相邻两个单元中心间隔弧长; N 为沿弧面分布的 LED 数量。

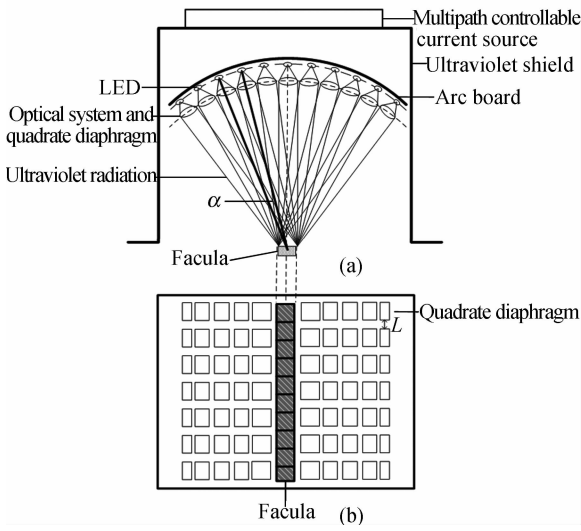
利用对于给定的现场条件(工作距离、固化面辐照度要求、均匀性、光带尺寸等)与 LED 工作参数等,可根据公式(1)(2)(3)的约束条件,设计出能满足固化需求的光学系统。需要说明的是,由于该系统选用了较为灵活的 LED 驱动方式,在 LED 数量的选择上也具有较大的灵活性。理论上可以任意增加阵列中的 LED 个数,通过控制 LED 的明暗亮灭,兼顾各种固化材料对紫外辐照度的需求,提高系统的适用性,但实际中通常用于某几种特定的固化材料,LED 数量过多增加了系统成本和加工复杂度,造成资源浪费。因而应当综合考虑使用环境来确定 LED 数量。

3.3 光学系统仿真设计

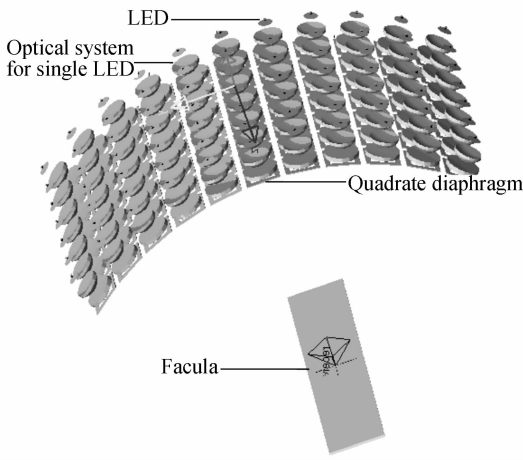
通过用光学设计软件进行了优化设计,最终得到了性能优良的紫外光源系统。因为光源的单个 LED 聚光准直系统性能指标、弧面基板的半径大小、基板上排布 LED 的数量与距离等参数直接关系到固化光源的紫外辐照度与均匀性的高低,因此在设计过程中要充分考虑各个参数,力求接近实际固化用光源的效果。

设计实例的光学系统结构截面图与立体图分别如图 4(a), (b) 所示。

系统中 LED 排布在半径为 r 的弧面基板上,LED 阵列行距均为 L , 每行相邻 LED 间隔为相同的圆心角 α 。LED 发出的紫外辐射光,经光学准直系统会聚成平行光,沿弧形半径方向射向圆心,于是排列在同一弧线上的 LED 发光将会聚于圆心处,此处的紫外光辐照度为同一行 LED 的辐照度之和。调整行距 L , 使各行会聚所得光斑连结。通过光学仿真软件计算,可以保证连结点处不出现光强突变点,最终得到一条均匀的光带,



(a) 截面图
(a) Sectional view



(b) 立体图
(b) Stereogram

图 4 LED 空间阵列光学系统结构图

Fig. 4 Structure of LED spatial array's optical system

即可实现紫外光固化用线(面)光源的作用。其中,在单个 LED 聚焦系统出瞳处加入方形光阑以确保光斑的形状。

下面给出了利用单管光功率为 60 mW(正常工作时,此种 LED 最大光功率为 85 mW)的 LED,获得辐照度达到 200 mW/cm²左右的,使用距离即弧面基板半径为 10 cm,光带长度约为 10 cm 的紫外光源的设计过程及结果。

设计单管 LED 准直系统,数值孔径 NA 为 0.5,光束发散角为 ±2°左右,经方形光阑后在基板圆心处的辐照度为 20 mW/cm²,近似方形光斑

约为 20 mm × 20 mm。根据式 (1) 得 $N \geq \left\lceil \frac{200}{20} \right\rceil$ 即 $N \geq 10$ 。考虑到衰减,取 $N=11$ 。综合光带长度要求,确定阵列由 11 × 7 个 LED 组成,LED 阵列行距 $L=2$ mm,相邻 LED 间隔圆心角 $\alpha=8^\circ$ 。

利用 Light Tools 对该系统进行光线追迹(图 5)。从辐照面上光带分布(图 6 与图 7)可以

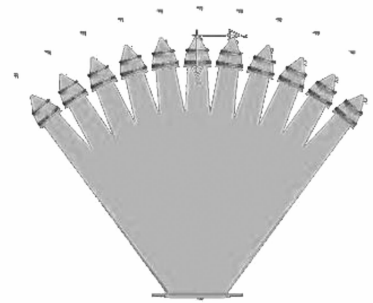


图 5 LED 空间阵列光学系统光线追迹图

Fig. 5 Ray tracing figure of LED spatial array's optical system

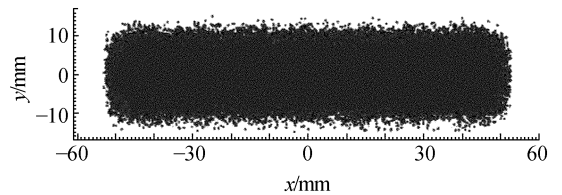


图 6 光带形状分布图

Fig. 6 Shape distribution of a facula

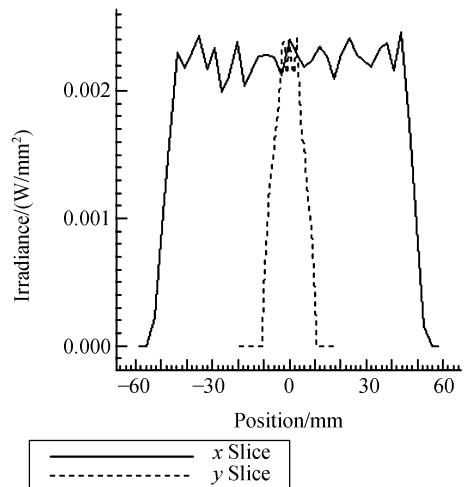


图 7 光带辐照度分布图

Fig. 7 Irradiance distribution of a facula

看出,LED 阵列发出的紫外光经该光学系统准直、会聚,光强分布在辐照面上一个较为规则的矩形区域内,光带上辐照度达到 200 mW/cm^2 ,并且沿 x 、 y 方向均无辐照度突变点出现,亦无沿某一方向辐照度发生明显强弱变化的情形出现,光强分布较为均匀。

4 结 论

本文对 LED 阵列式新型紫外固化光源的光学系统进行了设计,采用 LED 空间阵列结构来提

高光源系统的紫外辐照度和均匀性,并通过 Zemax 和 Light Tools 光学软件对设计实例进行设计仿真。结果表明,采用本文设计的 LED 阵列式紫外固化光源用光学系统,紫外光带上辐照度可高达 200 mW/cm^2 ,光强分布均匀稳定,能够满足紫外光固化过程对光源的指标要求。本光学系统的实现方法还具有很大的灵活性,采用其他更大功率的 LED,或增加阵列单元的个数,即可根据需要在不影响均匀性的前提下提高光源的紫外光辐照度,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 朱胜武,施文芳. 紫外光/电子束固化市场状况及发展趋势[J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2001,19(3):161-167.
ZHU SH W, SHI W F. The market and development of UV/EB curing technology[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2001,19(3):161-167. (in Chinese)
- [2] 张红鑫,卢振武,王瑞庭,等. 曲面复眼成像系统的研究[J]. 光学 精密工程,2006,14(3):346-350.
ZHANG H X, LU ZH W, WANG R T, *et al.*. Study on curved compound eye imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3):346-350. (in Chinese)
- [3] 匡丽娟,翟金会,阮玉,等. 复眼透镜阵列应用于均匀照明系统的特性研究[J]. 光学与光电技术,2005,3(6):29-31.
KUANG L J, ZHAI J H, RUAN Y, *et al.*. Characteristics of fly-eye lens in uniform illumination system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, 3(6):29-31. (in Chinese)
- [4] 刘江,刘承宜,杨友源,等. 用于动物细胞和组织培养的新型 LED 生物光源系列[J]. 光子学报,2004,33(2):151-154.
LIU J, LIU CH Y, YANG Y Y, *et al.*. The novel light emitting diode (LED) source system for animal cell or tissue culture[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(2):151-154. (in Chinese)
- [5] 方志良,刘福来,王湘辉,等. 高亮度 LED 铁路信号机光学系统研究[J]. 光电子激光,2005,16(12):1433-1436.
FANG ZH L, LIU F L, WANG X H, *et al.*. Optical system of high-luminosity LED railway annunciator[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, 16(12):1433-1436. (in Chinese)
- [6] 王德海,江根. 紫外光固化材料-理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2001.
WANG D H, JIANG L. *UV Curing Materials-Theory and Application*[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [7] 万峰,范世福. 以 c8051F020 为核心的 CCD 驱动与采集系统的设计[J]. 光学 精密工程,2005,13(增):179-182.
WAN F, FAN SH F. Development of driving and sampling circuit for CCD based on c8051F020[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(Supp.):179-182. (in Chinese)
- [8] 岱钦,宋文武,王希军. 高频半导体激光器的驱动设计及稳定性分析[J]. 光学 精密工程,2006,14(5):745-748.
DAI Q, SONG W W, WANG X J. Design and stability analysis of high frequency LD's driving circuit[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5):745-748. (in Chinese)
- [9] 梁凤超,胡君,续志军. 激光直写凹球面网栅的电控实现[J]. 光学 精密工程,2006,14(5):792-796.
LIANG F CH, HU J, XU ZH J. Realization of electric control of laser direct writing mesh on concave spherical substrate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5):792-796. (in Chinese)
- [10] 何修军,杨华军,邱琪. 阵列半导体激光器光束准直设计[J]. 激光技术,2004,28(6):528-530.
HE X J, YANG H J, QIU Q. The collimation design of the semiconductor laser array light beams[J]. *Laser Technology*, 2004,28(6):528-530. (in Chinese)
- [11] 王璘,施浣芳,王忠厚,等. 半导体激光器光束准直系统设计[J]. 西安工业学院学报,2004,24(2):141-143.

WANG L, SHI H F, WANG ZH H, *et al.*. Design of optics system for laser diode beam collimation[J]. *Journal of Xi'an Institute of Technology*, 2004, 24(2): 141-143. (in Chinese)

[12] 李士贤, 李林. 光学设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.

LI SH X, LI L. *Optics Design Manual*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. (in Chinese)

作者简介:许文海(1956—),男,吉林扶余人,大连海事大学信息工程学院教授,博士生导师,主要从事光电检测与光电信息方面研究。E-mail: whxu@newmail. dlmu. edu. cn