

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.03.017

紫外 LED 光源对油墨固化效率的研究

董克凡, 刘 昕

(西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对现有固化设备固化速率缓慢、自主选择固化所需的紫外 LED 性能差的问题,提出了一种适用于紫外光固化的 LED 光源装置。该装置利用不同波长的紫外 LED 组成阵列结构,实现对油墨固化所需的辐射能量,也能适用于不同的油墨。使用实验设计手法改变 LED 光照的工作距离、紫外 LED 阵列方式以及设备运行速度进行实验,实验结果显示,在相同的实验条件下,工作距离、紫外 LED 阵列方式以及传送带运行速度的改变均导致固化速率发生改变。新的固化装置固化效率、灵活性都优于传统的紫外 LED 固化设备。

关键词: 油墨; 紫外线固化; LED 阵列; 能量分布

中图分类号: TS803.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2019)03-0378-04

Study on curing efficiency of ink by UV LED light source

DONG Kefan, LIU Xin

(School of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Due to the slow curing rate of current curing equipment and poor performance of UV LED required by self-selection for curing, an LED light source device suitable for UV curing is proposed. The device uses UV LED of different wavelengths to form an array structure, realizing the radiation energy required for ink curing, and it can also be applied to different curing agents. The experimental design method is used to change the working distance of LED lights, the array way of UV LED and the running speed of equipment to carry out experiments. Experimental results show that under the same experimental conditions, the changes in working distance, the array way of UV LED and the operating speed of conveyor belt will lead to changes in curing rate. The new curing device is more efficient and flexible than the traditional UV LED curing equipment.

Key words: ink; UV curing; LED arrays; energy distribution

紫外光固化^[1-2]是指固化材料吸收紫外光线(主要以 365 nm、385 nm 和 395 nm 为主峰^[3]的波段)从而发生化学反应,在短时间内由液态变为固态的化学反应过程。目前,紫外光固化技术已广泛应用于印刷、包装、广告、建材、电子、汽车、医学等^[4]行业。在印刷行业,相对于传统的汞灯存在的高能耗、预热时间长、产生臭氧等问题,新型的紫外 LED 具有波长范围固定、针对性的辐射固化、紫外光利用率高、效率高、使用寿命长、功耗低、噪声小、散热效果极好、低碳环保、环境污染小、不产生臭氧等优点。

但是紫外 LED 灯存在单一波长的紫外 LED 光固化装置只能适用于 LED 专用油墨这种局限性问题,限制了其在印刷领域的应用,使得在有些方面不能达到全自动化生产而需要人工对其进行分类印刷。

为了解决上述问题,增加设备的灵活性,使其可以根据油墨的种类自主选择光源的波段和波长,本文提出了不同波长紫外光 LED 排列组合方案,由于单一的紫外 LED 难以满足生产需要,该方案通过选择三种不同波长(365 nm、385 nm 和 395 nm)的紫外 LED 并通过在空间上合理的阵列设计,来实现辐

收稿日期: 2018-10-11

基金项目: 陕西省重大科技创新资助项目(2008ZKC02-13)

作者简介: 董克凡,男,硕士生,研究方向为印刷机械。E-mail:645533812@qq.com

通讯作者: 刘昕,男,教授,博士,研究方向为印刷机械。E-mail:liuxin@xaut.edu.cn

射面的光功率、光斑尺寸和实际的使用要求,并通过具体的实验,对不同波长的紫外 LED 能量进行分析对比,从而验证该方案的可行性和有效性。

1 理论分析

1.1 设计原理

紫外光固化需要在极短的时间内,让固化材料吸收固化光源所提供的高强度均匀紫外光线。由于紫外光线是不可见光,在印刷固化中通常用辐照能量^[5](单位为 mJ/cm^2)来表示固化所需要的紫外光能量的大小。单一的紫外 LED 在无聚光情况下是达不到固化所需能量的,所以通常情况下有两种方式来增加紫外 LED 的辐照度:①在紫外 LED 发光面前增加有聚光效果的透镜^[6-7],将紫外 LED 发散的辐射能量集中,如图 1 所示, a 点代表紫外 LED 位置, l 代表紫外 LED 到透镜的距离, l' 代表透镜到工作面的距离, S 代表光斑面积;②增加紫外 LED 的数量,采用阵列结构,使光源的辐照度达到固化的需求。

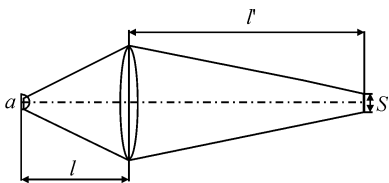


图 1 紫外 LED 和聚光透镜装置

Fig. 1 UV LED and concentrated lens system

目前在医学上紫外光固化用的紫外 LED 点光源装置会采用第一种方式,典型产品的单管紫外 LED 能量在 200 mJ 时,若采用聚光透镜使得光斑直径为 4 mm ,汇聚点的辐射能量可达到 $800 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。但是这种方法得到的辐射能量受到单个紫外 LED 发光能量以及发光面的限制,工作距离短(一般不超过 5 cm)、光斑面积小,而且其温度经过聚光透镜之后在光斑内会有所升高,只适应于固化时能够承受较高表面温度且不易变形的材料。第二种方式使用多个紫外 LED,采用合理的阵列结构,增加了其照射范围,改变紫外 LED 参数还可以实现较大工作距离的使用要求。本文通过优化第二种方式,使用不同波长的紫外 LED 混合连接成阵列结构。

1.2 结构设计

在实际生产中设计不同的紫外 LED 阵列结构时,必须满足以下几点要求:工作距离^[8]、产生的光斑面积以及辐照能量的大小等指标,而且需要结合单个紫外 LED 的大小尺寸在空间上进行最优设计排布^[9]。

图 2 给出了紫外 LED 阵列装置在空间上的几何排列结构,其中, d 为单个紫外 LED 宽度, d' 为两

个紫外 LED 的间距, d'' 为整个基板的宽度,它决定了在基板上紫外 LED 的最大数量 N ,即 $N \leq \frac{d'' - d'(N-1)}{d}$,基板宽度越宽,则基板上可排列

的紫外 LED 数量越多,但相对的,阵列装置的辐照光斑面积也就越大,单位面积所接受到的辐照能量也就会随之降低。 S' 为整个 LED 阵列装置的辐照面的叠加宽度, S'' 为单颗 LED 辐照面宽度, θ 为单个紫外 LED 的发散角,其与工作距离 L 之间的关系满足 $S' = \frac{5L \tan \frac{\theta}{2}}{2}$,工作距离 L 和基板宽度 d''

满足 $d'' = 2L \tan \varphi$ 。如果基板宽度 d'' 太大,基板两侧的紫外 LED 辐射角度一定,两侧的辐照能量就不能够顺利叠加到 S' 处,从而达不到应有的固化效果。辐照面单管紫外 LED 的辐照能量为 E_s (固定值),固化要求的辐照能量为 E ,则紫外 LED 数量 N ^[10] 应满足 $N \geq \frac{E}{E_s}$ (N 取正整数)。考虑到工作距离不能过大,发散角与中心线的夹角 φ 一般不大于 45° 。所以实际空间上紫外 LED 的数量应满足 $N \leq \frac{2L \tan 45^\circ}{d}$,最终依据 $\frac{E}{E_s} \leq N \leq \frac{2L \tan 45^\circ}{d}$ 找出满足条件的紫外 LED 数量 N 。

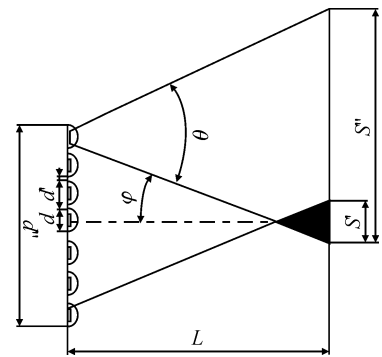


图 2 空间紫外 LED 阵列装置的几何结构
Fig. 2 Geometry of the space UV LED array

2 实验

2.1 实验材料及设备

紫外光固化油(UVD-LED-5001S1 黑色油墨):工业级,深圳市美联兴油墨有限公司;365 nm LED 灯珠:厂牌韩国 LG,型号 LEUVA 33U70RL00;385 nm LED 灯珠:厂牌韩国 LG,型号 LEUVA 33U70TL00;395 nm LED 灯珠:厂牌韩国 LG,型号 LEUV-V624A;光固化机:厂牌科之艺,型号 KJC-4LED;紫外能量计:厂牌林上,型号 LS121;测速仪:厂牌 Victor,型号 VC6236P。

2.2 原理方法

利用实验设计 DOE(design of experiment)来设计测试参数并分析其结果,更重要的是利用其中的“筛选设计(screening design)”找出不同工作距离、不同波长的紫外 LED 灯珠阵列以及不同的运行速度对油墨固化速率的影响。

2.3 实验设计

实验以 UVD-LED-5001S1 黑色油墨为例,设定墨层厚度为 $5\mu\text{m}$,要使得墨层能够完全固化,则辐射度要求 E 大于 $1\ 000\ \text{mJ}/\text{cm}^2$,单管 LED 辐照度 E_s 为 $150\ \text{mJ}/\text{cm}^2$,则最低需要紫外 LED 的数量 $N=7$,在空间尺寸上要求紫外 LED 的数量 $N<18$,故紫外 LED 的数量 $N=7$ 实现技术要求。实验选用 $365\ \text{nm}$ 、 $385\ \text{nm}$ 和 $395\ \text{nm}$ 三种不同波长的紫外 LED 灯珠,将 63 个 LED 分成 9 组,每 7 个串联起来,以 9×7 的空间形式分布于基板上,LED 行距为 $2.2\ \text{mm}$ (见图 3)。其中, $365\ \text{nm}$ 灯珠排列在第 1 行和第 2 行, $395\ \text{nm}$ 灯珠排列在第 3 行到第 5 行, $385\ \text{nm}$ 灯珠排列在第 6 行和第 7 行,具体实物图和发光效果图如图 3 所示。实验过程中,将使用光固化机(含有传动带)来分别安装两只不同组合的紫外 LED 灯组,使用测速仪来检测传送带的速度,并对实验进行对比分析。

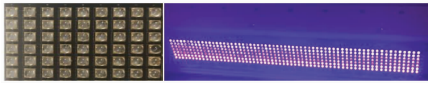


图 3 $365\ \text{nm}$ 、 $385\ \text{nm}$ 和 $395\ \text{nm}$ 紫外 LED 组合阵列系统
Fig. 3 Combined array system of $365\ \text{nm}$, $385\ \text{nm}$ and $395\ \text{nm}$ ultraviolet LED

3 结果和讨论

3.1 改变工作距离对固化效果的影响

当工作距离变为 $5\ \text{cm}$ 和 $3\ \text{cm}$ 时,固定紫外 LED 阵列为 $365\ \text{nm}$ 、 $385\ \text{nm}$ 和 $395\ \text{nm}$ 的灯珠,传送带速度调节至 $36\ \text{m}/\text{min}$,其辐射能量值如表 1 所示,从表 1 中可以得出, $5\ \text{cm}$ 相对于 $3\ \text{cm}$ 的工作距离,其辐射能量降低。

表 1 不同工作距离辐射能量对比表

Tab. 1 Comparison table of radiation energy at different working distances

| 实验序号 n | 辐射能量/ (mJ/cm^2) | |
|----------|---------------------------------|---------------------|
| | $5\ \text{cm}$ 工作距离 | $3\ \text{cm}$ 工作距离 |
| 1 | 930 | 1 059 |
| 2 | 967 | 1 068 |
| 3 | 934 | 1 064 |
| 4 | 932 | 1 196 |
| 5 | 939 | 1 140 |
| 平均值 | 940 | 1 105 |

$$\rho_L = \frac{E_{L3} - E_{L5}}{E_{L3}} \times 100\% = \frac{1\ 105.4 - 940.4}{1\ 105.4} \times 100\% = 14.9\% \quad (1)$$

式中: ρ_L 为不同的工作距离对辐射能量产生影响所占的百分比; E_{L3} 为工作距离为 $3\ \text{cm}$ 时的辐射能量; E_{L5} 为工作距离为 $5\ \text{cm}$ 时的辐射能量。

3.2 改变紫外 LED 灯珠阵列对固化效果的影响

当改变灯珠阵列时,选用 $385\ \text{nm}$ 和 $395\ \text{nm}$ 紫外 LED 灯珠阵列装置与 $365\ \text{nm}$ 、 $385\ \text{nm}$ 和 $395\ \text{nm}$ 紫外 LED 灯珠阵列装置,此时调节传送带速度为 $36\ \text{m}/\text{min}$,固定器工作距离为 $5\ \text{cm}$,其辐射能量值如表 2 所示,从表 2 中可以得出, $365\ \text{nm}$ 、 $385\ \text{nm}$ 和 $395\ \text{nm}$ 的紫外 LED 阵列相对于 $385\ \text{nm}$ 和 $395\ \text{nm}$ 的紫外 LED 阵列,其辐射能量降低。

$$\rho_a = \frac{E_2 - E_3}{E_2} \times 100\% = \frac{1\ 007.6 - 940.4}{1\ 007.6} \times 100\% = 6.7\% \quad (2)$$

式中: ρ_a 为不同波长的紫外 LED 灯珠阵列对辐射能量产生影响所占的百分比; E_2 为 2 种不同 LED 灯珠阵列组合的辐射能量; E_3 为 3 种不同 LED 灯珠阵列组合的辐射能量。

表 2 不同波长的紫外 LED 灯珠阵列辐射能量对比表

Tab. 2 Comparison table of radiation energy of ultraviolet LED bead array with different wavelengths

| 实验序号 n | 辐射能量/ (mJ/cm^2) | |
|----------|---------------------------------|--------|
| | 三种波长阵列 | 两种波长阵列 |
| 1 | 930 | 1 009 |
| 2 | 967 | 1 022 |
| 3 | 934 | 1 003 |
| 4 | 932 | 1 003 |
| 5 | 939 | 1 001 |
| 平均值 | 940 | 1 008 |

3.3 改变运行速度对固化效果的影响

当传送带速度分别为 $36\ \text{m}/\text{min}$ 和 $18\ \text{m}/\text{min}$ 时,选定紫外 LED 阵列装置为 $385\ \text{nm}$ 和 $395\ \text{nm}$ 的灯珠,并且工作距离设定为 $5\ \text{cm}$,此时辐射能量对比值如表 3 所示,从表 3 中可以得出,传送带速度 $36\ \text{m}/\text{min}$ 的紫外 LED 阵列相对于传送带速度 $18\ \text{m}/\text{min}$ 的紫外 LED 阵列,其辐射能量降低。

$$\rho_v = \frac{E_{18} - E_{36}}{E_{18}} \times 100\% = \frac{1\ 998.4 - 1\ 007.6}{1\ 998.4} \times 100\% = 49.6\% \quad (3)$$

式中: ρ_v 为不同的运行速度对辐射能量产生影响所占的百分比; E_{18} 为传送带运行速度为 $18\ \text{m}/\text{min}$ 时

的辐射能量; E_{36} 为传送带运行速度为 36 m/min 时的辐射能量。

表 3 不同的运行速度辐射能量对比表

Tab.3 Radiation energy comparison of different operating speeds

| 实验序号 n | 辐射能量/(mJ/cm ²) | |
|----------|----------------------------|----------------|
| | 传送带速度 36 m/min | 传送带速度 18 m/min |
| 1 | 1 009 | 1 980 |
| 2 | 1 022 | 1 962 |
| 3 | 1 003 | 1 932 |
| 4 | 1 003 | 2 063 |
| 5 | 1 001 | 2 055 |
| 平均值 | 1 008 | 1 998 |

根据以上实验数据可以看出,固化所需的辐射能量值,会根据传送带运行速度的不同、不同波长紫外 LED 光源的混合使用以及工作距离的不同而产生相应的改变。根据上述 3 个表格可以得出几点结论:①更换不同的紫外 LED 阵列结构,设备固化效率变化幅度在 10%以内;②当设定的工作距离的变化量在 1~2cm 之间时,设备固化效率变化幅度在 10%~20%之间;③在其他条件不变的情况下,调节传送带速度,固化效率最大可提升 50%。在实际设计生产中,为了增加固化效率,可以降低其工作距离、改变紫外 LED 灯珠的组成或调整其工作速度。实验结果表明,在固化效果上,365 nm、385 nm、395 nm 三种不同 LED 的光源和 385 nm、395 nm 两种不同 LED 的光源都能达到稳定的能量值。

4 结 语

本文充分利用紫外 LED 的特点,设计出一种可以适用于不同型号波长的紫外 LED 阵列装置。实验结果表明,该装置满足现实生产需要,可以灵活高效地发挥不同型号的紫外 LED 优势,使油墨能够完全固化,并且性能良好、成本低廉、绿色环保。可以根据实际需要,通过增减 LED 的数量来控制固化所需的辐射能量值。本设计只针对紫外 LED 阵列,若采用单个光学透镜,效果会更加理想。

参考文献:

[1] 金养智. 光固化材料性能及应用手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2010.

[2] 赵桐. UV 油墨固化性能及组成[J]. 今日印刷, 2015, (8):57-60.

ZHAO Tong. Curing performance and composition of UV ink [J]. Print Today, 2015, (8):57-60.

[3] 葛惊寰, 刘春林. UV 油墨固化光源的比较[J]. 丝网印刷, 2013, (2):24-28.

GE Jinghuan, LIU Chunlin. Comparison of UV ink curing light source [J]. Screen Printing, 2013, (2):24-28.

[4] 吕延晓. 辐射(UV/EB)固化国际市场近况[J]. 精细与专用化学品, 2017, 25(1):1-11.

LÜ Yanxiao. Overview of the international market for radiation (UV/EB) curing [J]. Fine and Specialty Chemicals, 2017, 25(1):1-11.

[5] 杨永吉, 赖尹婷, 赖明华, 等. 新型光稳定剂应用于水性光固化涂料中固化能量影响度与减缓瞬间黄变的研究[J]. 现代涂料与涂装, 2016, 19(1):1-5,32.

YANG Yongji, LAI Yinting, LAI Minghua, et al. Light stabilizers enhance color protection during curing process in waterborne UV-curable coatings[J]. Modern Paint & Finishing, 2016, 19(1):1-5,32.

[6] 韩敏, 叶正南, 施悦强, 等. 适用于 LED 阵列光源的新型双层 TIR 透镜设计[J]. 电子科技, 2017, 30(4):128-130,135.

HAN Min, YE Zhengnan, SHI Yueqiang, et al. Research and design of novel double-layer TIR lens for LED source array[J]. Electronic Science and Technology, 2017, 30(4):128-130,135.

[7] 丁毅, 郑臻荣, 顾培夫. 实现 LED 照明的自由曲面透镜设计[J]. 光子学报, 2009, 38(6):1486-1490.

DING Yi, ZHENG Zhenrong, GU Peifu. Freeform lens design for LED illumination [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(6):1486-1490.

[8] 郝新青, 罗梦, 冷鑫, 等. 三种光固化灯在不同照射距离对复合树脂固化的影响[J]. 口腔材料器械杂志, 2011, 20(2):71-74.

HAO Xinqing, LUO Meng, LENG Xin, et al. Curing performance of three different curing lights at different distances for a resin composite[J]. Chinese Journal of Dental Materials and Devices, 2011, 20(2):71-74.

[9] 芦永军, 许文海, 曲艳玲, 等. 365nm 紫外 LED 二维空间阵列光学系统设计[J]. 光子学报, 2009, 38(2):268-271.

LU Yongjun, XU Wenhai, QU Yanling, et al. Optical system design of two-dimensional array of 365 nm UV LED [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(2):268-271.

[10] 董克凡. 可变波长 UV-LED 固化单元的设计研究[D]. 西安:西安理工大学, 2019.

DONG Kefan. Study on the design of variable wavelength UV-LED curing unit[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.