

基于节能理念的 LED 光源快速成型系统

解瑞东, 李涤尘

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049

摘要 LED-SL 是采用大功率 UV-LED 作为固化光源的新型快速成型系统。其基本原理是 LED 发出的紫外光通过聚焦镜汇聚到树脂液面, 该聚焦镜在机械式 $x-y$ 工作台的驱动下, 在树脂液面进行扫描, 使液态光敏树脂固化。通过与激光和汞灯光源的比较, 阐述了 UV-LED 固化光源的优势。由于机械式工作台的运动学特性, 在扫描固化线时, 光束总是在其起始端从静止开始加速, 在中段保持匀速运动, 到达终点时又减速到静止状态。由于加速和减速段的曝光量大于中间段, 使得固化单线两头粗中间细, 形成骨形误差。采用功率匹配的能量控制方式以消除骨形误差。功率匹配是指动态调整光束功率, 使得扫描过程中光功率始终与扫描速度成正比。实验结果表明功率匹配方式能有效提高成型精度。UV-LED、激光、高压汞灯 3 种固化光源能耗的实验表明, UV-LED 的光固化能耗仅为激光的 0.86%, 汞灯的 0.1%, 从而证明了 LED-SL 突出的节能优势。

关键词 光固化; 骨形误差; 节能; UV-LED

中图分类号 TH164

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.01.004

Energy-conserving Stereolithography System with UV-LED Light Source

XIE Ruidong, LI Dichen

State Key Laboratory of Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract An inexpensive stereolithography (SL) system with high power UV-LED curing light source, the LED-SL, is developed. The working principle of the UV-LED light based SL system (LED-SL) and its characteristics are discussed. The divergent UV light emitted from the LED is focused on the resin surface by a set of focusing lens. Controlled by the computer, the workbench drives the scanner to move along $X-Y$ plane, and polymerizes the liquid resin according to the current cross-section of a layered part. The advantages of UV-LED light source are analyzed. Because of the kinematic behavior of the mechanical scanning workbench, the exposure at the ends of a single cured line is much greater than that in the middle segment, and hence bone-shaped errors would occur, which means that the ends of a cured line have larger sizes than the middle segment. The power matching scanning method is used to improve the accuracy of a cured line, dynamically adjusting the beam power to ensure that the power is proportional to the scanning speed. The experimental results indicate that the power matching method can effectively improve the building accuracy. The SL energy consumption of UV-LED, laser and UV lamp sources are experimentally compared, and the results show that the energy consumption of UV-LED is merely 0.86% of laser and 0.1% of UV lamp, an outstanding energy conservation performance of the LED-SL.

Keywords stereolithography; bone-shaped errors; energy conservation; UV-LED

0 引言

制造业在为社会生产产品的同时, 消耗了大量能源。目前, 中国能源紧缺问题日益突出。提倡节能减排, 发展绿色制

造, 成为中国制造业发展的必然趋势^[1]。目前光固化快速成型技术普遍采用激光光源, 能耗较大。开发采用节能光源的快速成型系统, 在节约能耗和实现绿色制造方面具有积极意义。

收稿日期: 2011-11-01; 修回日期: 2011-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51005177)

作者简介: 解瑞东, 博士研究生, 研究方向为光固化快速成型, 电子信箱: rd.xie@stu.xjtu.edu.cn; 李涤尘(通信作者), 教授, 研究方向为快速成型新工艺新方法, 电子信箱: dcli@mail.xjtu.edu.cn

LED 光源具有节能、高单色性、使用寿命长、成本低等优点,在光固化领域有广泛的应用前景。特别是大功率 UV-LED 的成功面世,为其用作光固化光源创造了条件。李涤尘等^[2]率先开发了以大功率 UV-LED 为光源的新型光固化成型系统 LED-SL(图 1)。该成型机的能耗远低于激光器和以高压汞灯为固化光源的 CPS 成型机^[3],符合绿色制造的发展趋势。LED-SL 系统具有两个突出特点:(1) 根据扫描速度的变化动态调整光功率,实现了功率匹配扫描,消除了固化单线的骨形误差(由于工作台加速和减速造成固化单线两端粗中间细的现象);(2) 与激光、CPS 成型机相比,具有突出的节能优势。

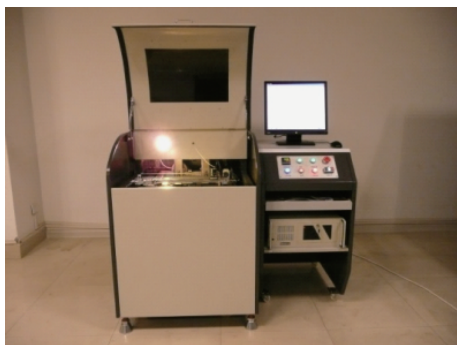


图 1 LED-SL 350 光固化成型机
Fig. 1 LED-SL 350 apparatus

1 LED-SL 工艺原理

LED-SL 系统的基本原理如图 2 所示。系统由 LED 光源、聚焦镜、x-y 工作台、z 轴升降台、控制系统组成。LED 发出的紫外光通过聚焦镜汇聚到树脂液面,聚焦镜在 x-y 工作台的驱动下,根据零件当前层的截面形状做扫描运动,使得液态树脂固化。完成当前层的制作后,z 轴升降台下降 1 个层厚,下 1 层的制作开始。如此逐层累积,完成整个零件的制作。

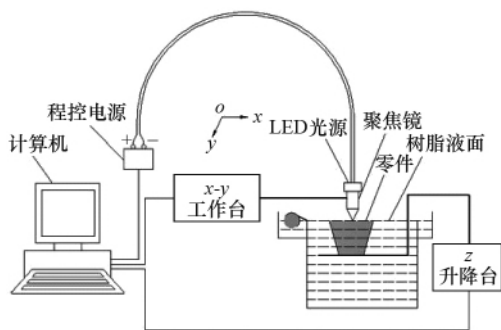


图 2 LED-SL 系统原理图
Fig. 2 Schematic diagram of LED-SL

2 UV-LED 与激光和汞灯光源的综合比较

表 1 通过对比 LED-SL 成型机的大功率 UV-LED、Awave-355nm 激光器(Advanced Optowave 公司,美国)和 CPS

成型机紫外汞灯光源系统的性能特点,说明了 UV-LED 固化光源的特点与优势。

表 1 UV-LED、激光器和紫外汞灯光源的比较

Table 1 Comparison of UV-LED, Laser and UV lamp

参数	UV-LED	Awave-355nm	紫外汞灯
波长/mm	365	355	300—500
光谱与树脂的匹配性	匹配	匹配	仅有少量光谱匹配
电压/电流	DC 3.8V/0.5A	AC 220V/3A	AC 220V/4.4A
耗电功率/W	1.9	660	970
额定光功率/mW	190	350	—
聚焦光束功率/mW	13.3	250	3.5
发热	低	高	高
光斑直径/mm	0.42	0.12	0.65
聚焦光束发散角/(°)	83	接近 0	81
开启时间	<1ms	25min	5—15min
寿命/h	10000	5000	3000
成本	最低	高	较低
尺寸	小	最大	较大

3 固化单线骨形误差的消除

在光固化成型工艺中,最基本的扫描运动是聚焦光束的往复式直线运动。传统扫描模式下扫描速度、光功率与时间、位移的关系曲线如图 3 所示。在扫描 1 条固化线时,光束总是在固化线的起始端从静止开始加速,在中段保持匀速运动,到达终点时又减速到静止状态。在加速和减速段曝光量大于中间段,使得固化线两头粗中间细,形成骨形误差。LED-SL 成型机采用机械式扫描工作台,其骨形误差比激光固化单线的骨形误差更明显,骨形误差的累积将明显影响零件的制作精度。

本文采用功率匹配的能量控制方式消除骨形误差。功率匹配是指动态调整光束功率,使光功率始终与扫描速度成正比,即 P_L/V_s 值保持不变,则根据 Jacobs 的最大固化深度 C_d 和最大固化线宽 L_w 公式^[4](式(1)和式(2)), C_d 和 L_w 值将始终保

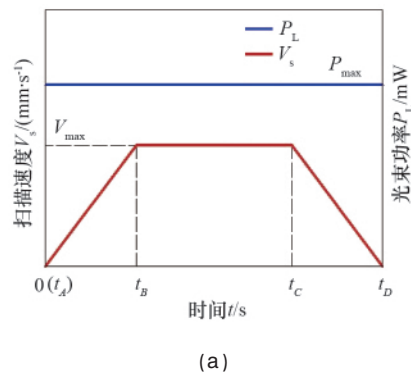


图 3 传统曝光方式的 V_s, P_L-t (a) 和 V_s, P_L-x (b) 曲线
Fig. 3 V_s, P_L-t (a) and V_s, P_L-x (b) curves of traditional scanning method

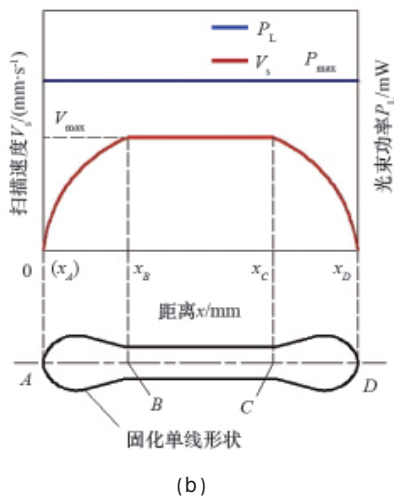


图3 传统曝光方式的 V_s, P_L-t (a) 和 V_s, P_L-x (b) 曲线 (续)
Fig. 3 V_s, P_L-t (a) and V_s, P_L-x (b) curves of traditional scanning method (continued)

持一致。功率匹配模式下扫描速度、光功率与时间、位移的关系曲线如图4所示。UV-LED光源具有光功率与工作电流成正比的特性,通过计算机控制LED电流的大小,即可实现对光功率的动态调节。

$$C_d = D_p \ln \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{W_0 V_s E_c} \right) \quad (1)$$

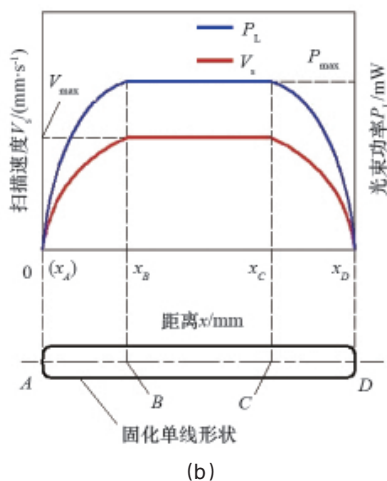
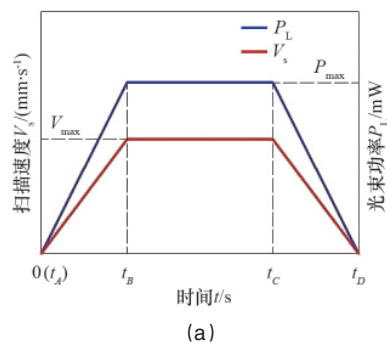


图4 功率匹配方式的 V_s, P_L-t (a) 和 V_s, P_L-x (b) 曲线
Fig. 4 V_s, P_L-t (a) and V_s, P_L-x (b) curves of power matching method

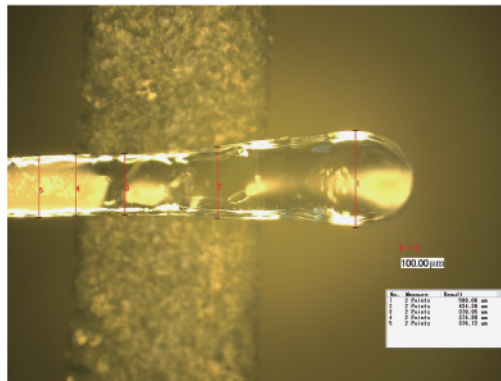
$$L_w = W_0 \sqrt{2 \ln \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{W_0 V_s E_c} \right)} = W_0 \sqrt{\frac{2 C_d}{D_p}} \quad (2)$$

其中, W_0 为聚焦光斑半径, D_p 为树脂穿透深度。

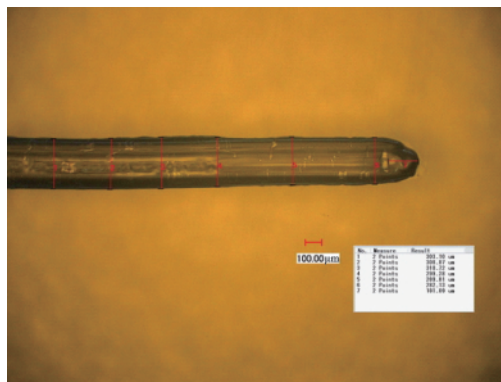
分别以传统曝光方式和功率匹配方式制作固化单线,制作条件如表2所示,制作结果如图5所示,测量结果如表3所示。根据测量结果,传统曝光模式的固化单线末端的宽度明显大于中间段,骨形误差明显;而功率匹配模式制作的固化线末端和中间段的线宽基本一致,有效消除了骨形误差。

表2 制作条件
Table 2 Fabrication conditions

参数	LED-SL	CPS	LPS
	成型机	成型机	激光成型机
填充方向	奇数层 x , 偶数层 y		
层厚/mm	0.2	0.2	0.1
扫描速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	500	100	4000
加速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$)	4000	4000	—
填充间距/mm	0.1	0.1	0.1
半径补偿/mm	0.05	0.1	0.05
所用光敏树脂	XH-96-1		SOMOS14120



(a) 传统曝光方式
(a) Traditional scanning method



(b) 功率匹配方式
(b) Power matching method

图5 不同曝光方式制作的固化单线
Fig. 5 Single cured lines scanned by using different methods

表 3 不同能量控制方式的固化单线尺寸

Table 3 Measurement results of the cured lines

能量控制方式	中段尺寸/ μm	末端尺寸/ μm	精度
传统曝光方式	374(线宽)	590(线宽)	低
	285(厚度)	536(厚度)	
功率匹配	302(线宽)	282(线宽)	高
	208(厚度)	197(厚度)	

4 不同成型机固化能耗的比较

分别使用西安交通大学研制的 LED-SL、CPS、LPS 激光成型机制作大雁塔工艺模型,制作条件如表 2 所示。LED-SL 制作的模型样件如图 6 所示。根据表 1 的光源功率、每个模型的重量和光源累积工作时间,计算每制作 1kg 零件的耗能,见表 4。根据计算结果,CPS 成型机每 kg 制件耗能最高,LED-SL 成型机耗能最低,仅为激光的 0.86%,汞灯的 0.1%。可见 UV-LED 作为固化光源的节能优势是十分显著的。

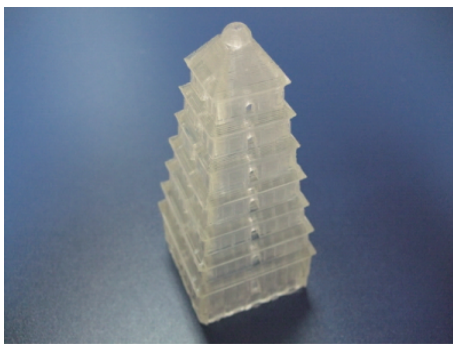


图 6 LED-SL 制作的大雁塔模型

Fig. 6 Great Goose Pagoda model

5 结论

本文介绍了新型光固化快速成型系统 LED-SL。该系统

表 4 模型测量结果和制作时间

Table 4 Measurement results and fabrication time of the models

成型机	尺寸/mm	重量/g	制作时间/h	光源工作时间/h	每千克 耗能/ (kW·h)
LED-SL	50×50× 113	45	8.5	8.5	0.36
CPS		45	17.1	17.1	368.6
激光成型机		57	3.6	3.6	41.7

采用功率匹配能量控制方式有效消除了固化单线的骨形误差,提高了扫描精度。激光、UV-LED、汞灯光源的光固化能耗的比较结果表明,LED-SL 制作单位质量零件的能耗远低于激光成型机和 CPS 成型机,符合节能减排、绿色制造的理念。

参考文献 (References)

- [1] 朱森第. 推行绿色制造,大力发展节能机械产品[J]. 机械工程师, 2006(9): 15-16.
Zhu Sendi. *Journal of Mechanical Engineer*, 2006(9): 15-16.
- [2] 李涤尘, 解瑞东, 黄晔矿, 等. 一种能量跟随点扫描光固化快速成型方法: 中国, ZL200910021572.7[P]. 2011-02-09.
Li Dicheng, Xie Ruidong, Huang Yekuang, et al. A power-matching point-scanning stereolithography technology: China, ZL200910021572.7 [P]. 2011-02-09.
- [3] Wu M L, Zhao W H, Tang Y P, et al. A novel stereolithography technology with conventional UV light [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2001(5): 268-274.
- [4] Jacobs P F. *Rapid prototyping and manufacturing-fundamentals of stereolithography* [M]. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, 1992.
- [5] 李涤尘, 王永信, 卢秉恒. 快速成形技术发展状况与趋势[J]. 电加工与模具, 2009(S1): 23-27.
Li Dicheng, Wang Yongxin, Lu Bingheng. *Electromachining & Mould*, 2009(S1): 23-27.

(责任编辑 安莹,刘志远)


 科技
导报
SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过 300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。