

## 激光透射焊接聚碳酸酯的有限元分析

Sekou Singare<sup>1</sup>, 陈盛贵<sup>1</sup>, 钟欢欢<sup>2</sup>

(1. 东莞理工学院 机械工程学院, 广东 东莞 523808;

2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 为了研究激光透射焊接塑料过程中温度分布对焊接显微结构和强度的影响, 采用 ABAQUS 软件, 建立了使用激光透射焊接技术焊接聚碳酸酯 (PC) 的三维有限元热分析模型, 通过子程序 DFLUX 和 FORTRAN 语言编程实现超高斯型热源的动态加载, 有限元分析得到激光透射连接过程中温度场的分布。结果表明: 当激光功率  $P=40\text{ W}$ , 焊接速度  $v=40\text{ mm/s}$  时, 焊接温度达到  $333.8\text{ }^\circ\text{C}$ , 焊接强度最高 ( $1.3\text{ kN}$ ), 焊接质量最好; 当焊接速度  $v=10\text{ mm/s}$  时, 最高温度达到  $589.5\text{ }^\circ\text{C}$ , 拉伸强度为  $0.4\text{ kN}$ 。当激光功率为  $40\text{ W}$ , 焊接速度为  $100\text{ mm/s}$  时, 焊接温度达到  $165.5\text{ }^\circ\text{C}$ , 拉伸强度为  $0.74\text{ kN}$ 。焊缝成形的好坏主要与焊接温度有关, 可通过选择合适的工艺参数对这些缺陷进行控制。

**关键词:** 激光透射焊接; 热塑性塑料; 有限元分析; 温度场; 焊接强度

中图分类号: TG456.7 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0206005

## Finite element analysis of laser transmission welding of polycarbonate

Sekou Singare<sup>1</sup>, Chen Shenggui<sup>1</sup>, Zhong Huanhuan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China;

2. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** A three-dimensional finite element analysis thermal model for laser transmission welding technique of polycarbonate (PC) was developed. Power distribution of moving heat source was implemented into DFLUX subroutine, written in FORTRAN programming language to simulate the temperature distribution during the laser transmission welding process. The effect of process parameters on the weld strength and weld width was analyzed. Data gained by numerical simulation was compared to data obtained by laser transmission welding experiments, and good agreement was found between the two trends. It was observed that for a particular value of the laser power, good bonding between two thermoplastic materials is a function of laser scanning speed. Too high speed will not produce any significant increase in temperature at the two material interfaces to have a good chemical bonding. On the other hand, too slow speed will cause excessive increase in temperature resulting in burnout condition for polycarbonate. For the ranges of parameters investigated in the current study, it was observed that for a

收稿日期: 2015-06-20; 修订日期: 2015-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(51445008); 广东省产学研结合项目(2012B091000012, 2013B090500130);

东莞市高等院校科研机构科技计划(2012108101001)

作者简介: Sekou Singare(1971-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光焊接技术与快速成型制造方面的研究。Email: sekou2d@yahoo.com

通讯作者: 陈盛贵(1984-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事激光加工及 3D 打印方面的研究。Email: 272731339@qq.com

laser heat flux of 40 W, good bonding occurs for a laser scanning of 40 mm/s. This shows that the finite element analysis can be used for optimization of process parameters.

**Key words:** laser transmission welding; thermoplastic; finite element analysis; temperature field; weld strength

## 0 引言

在塑料制品加工工程中, 由于注塑工艺等因素的限制, 许多形状和结构复杂的塑料制品不能一次注塑成型, 往往需要多个部件粘接而成。因此, 在塑料制品的加工过程中人们渴望一种更加快速、有效、干净的塑料加工方式。

近年来, 已经开发了工业领域的塑料零件的各种连接方法, 主要有振动摩擦焊接、热板式塑料焊接及超声波焊接等焊接技术, 但这些方法都有其不足之处。

为了改善传统塑料焊接方法的技术缺陷, 利用激光焊接两层或多层塑料成为国内外研究热点<sup>[1-10]</sup>。

文中在前期研究的基础上, 采用固体 300 W 的 Nd:YAG 激光器, 波长为 1064 nm 对聚碳酸酯(PC)材料进行焊接工艺研究, 并针对聚碳酸酯(PC)的激光透射焊接建立一个三维热传导模型, 使用有限元法求得焊接过程中温度场的分布, 得到温度场达到准稳态的时间, 分析焊接速度对焊接质量的影响。通过焊缝宽度计算值与实验测量值相比, 二者比较吻合。

## 1 理论模型的建立

在 ABAQUS 中模拟激光焊接过程中的瞬态温度场是通过热传递原理计算的, 热传导方程为:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_v \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为材料的密度;  $c$  为比热容;  $T$  为温度;  $t$  为时间;  $k$  为热传导系数;  $\nabla$  为温度梯度;  $q_v$  为激光热源在样品内部产生的热量。在模拟中, 根据比尔-朗伯定律激光束热源模型为体热源, 热源模型方程为:

$$q_v(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, & \text{for transparent part} \\ (1-R_a) K I_a e^{-kz} & ; \text{for absorbing part} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $R_a$  为吸收件的反射率( $R_a$  为 0.07);  $K$  为吸收件的吸收率;  $z_a$  为激光光束在吸收件中的深度;  $I_a$  为激光束穿透透明件后的激光强度。

$$I_a = \frac{T_t P}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (3)$$

式中:  $T_t$  为透明塑料的透射因子(transmission factor);  $P$  为激光功率(laser power), W;  $r_0$  为激光光斑直径。采用了 YAG 激光器, 功率为 100 W, 波长为 1064 nm。透明 PC 塑料厚度 3 mm 的透射因子为 0.92。

在初始条件下  $t=0$  时, 材料的初始温度为环境温度,  $T_0$  为 25 °C。

由于激光对塑料焊接时, 焊接表面存在热传导、对流及辐射换热。对于样品工件与环境之间的热传递边界条件可用方程表示为:

$$-k(T) = \nabla \cdot \vec{T}n = h(T_s - T_0) + \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_0^4) \quad (4)$$

式中:  $\vec{n}$  为焊接表面的法向量;  $h$  为对流换热系数;  $T_s$  是材料表面温度;  $T_0$  为材料初始温度;  $\varepsilon$  表示材料辐射系数;  $\sigma$  为斯特凡-玻尔兹曼常数( $\sigma$  为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ )。在激光焊接塑料的过程中, 当高能量的激光照射在焊接表面时, 吸收部件在极短的时间内吸收激光的能量转化成热量, 并向透明部件表面传导热量, 焊接处温度迅速升高, 使两部分的材料熔化, 冷却后融为一体形成焊缝。

## 2 建立 ABAQUS 模型

焊接材料为聚碳酸酯, 焊接接头形式及尺寸如图 1 所示。为了能较精确地反映模拟焊接温度场的分布规律, 采用 0.5 mm×0.5 mm×0.5 mm 细密网格

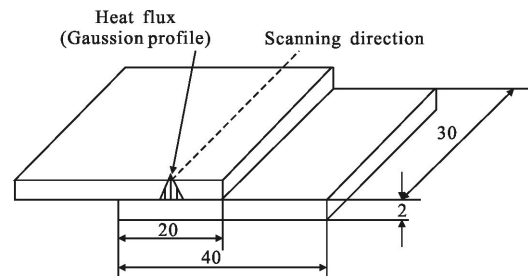


图 1 PC 焊接试验焊接形式及样品尺寸

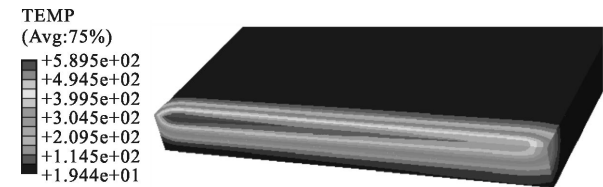
Fig.1 Schematic of the lap welding and the size of PC samples

进行划分。而在 ABAQUS 软件模拟热分析时有特定的热分析单元类型，由于是三维实体模型，采用 CD3R8 单元进行分析。

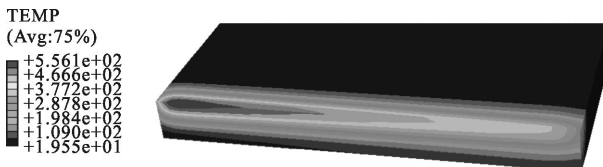
### 3 结果

#### 3.1 焊接速度对温度场的影响

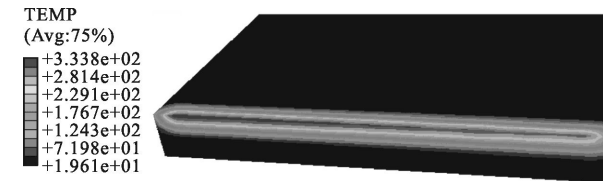
当激光功率分别为 40 W，光斑直径为 2.5 mm，焊接速度分别为 10、20、40、80、100 mm/s 时，在 PC 透明塑料和吸收塑料接触面上温度场的分布如图 2 所示。从图中可以看出随着焊接速度的增加焊接区域最高温逐渐降低。焊接速度为 10 mm/s 时，最高温度达到 589.5 °C。当焊接速度增加到 100 mm/s 时，焊缝区域的最高温度下降到 165.5 °C。



(a) 焊接速度为 10 mm/s  
(a) Welding speed=10 mm/s



(b) 焊接速度为 20 mm/s  
(b) Welding speed=20 mm/s



(c) 焊接速度为 40 mm/s  
(c) Welding speed=40 mm/s



(d) 焊接速度为 80 mm/s  
(d) Welding speed=80 mm/s



(e) 焊接速度为 100 mm/s  
(e) Welding speed=100 mm/s

图 2 X-Y 平面的温度分布

Fig.2 Temperature distributions on the lapped (X-Y) plane

#### 3.2 熔池几何形状

在有限元数值模拟中，图 3 表明了 PC 塑料在 X-Y 平面直角坐标的焊缝宽度及深度。从图 3 中可以看出透明塑料和吸收塑料的焊缝宽度和深度。图中温度 150 °C 以上的区域表示焊接深度。当激光功率为 40 W，焊接速度为 40 mm/s 时，经计算测量的焊缝宽度为 2.18 mm，透明塑料焊缝深度(DT)为 0.7 mm、吸收塑料焊缝深度(DA)为 0.58 mm。而焊接速度为 100 mm/s 时，焊缝宽度为 1.1 mm，透明塑料焊缝深度(DT)为 0.66 mm、吸收塑料焊缝深度(DA)为 0.55 mm。以上数据表明，焊接速度对焊缝宽度和深度有一定影响，随着焊接速度的增加，焊缝宽度和深度均有下降。

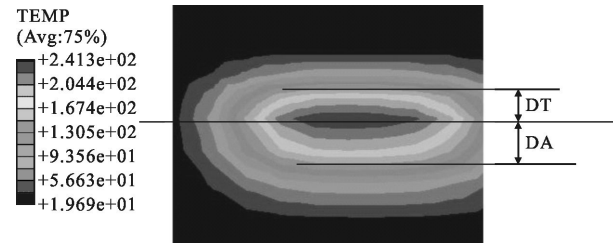


图 3 焊接数值模拟中获得透明和吸收 PC 塑料的熔融深度

Fig.3 Molten depths in the transparent and absorbing PC obtained in simulation

#### 3.3 激光焊接工艺实验

该实验所用激光器为 Nd:YAG 激光器，功率为 300 W，波长为 1 064 nm。采用搭接焊形式并研究激光器平均功率、焊接速度即透明塑料厚度等主要工艺参数对焊接质量的影响。采用拉伸试验机(电液式万能试验机 WA-300B 型)进行焊接强度测试。利用显微镜(KEYENCE-基恩士数码显微镜 VHX-600)进行焊缝形貌观察和焊缝宽度测试。

#### 3.4 数值模拟结果与试验值验证

透明塑料厚度为 3 mm，激光功率为 40 W 时，实验测得焊缝宽度和深度与数值模拟结果进行了比较

如表 1 所示。可以看出,两者基本吻合,从而验证了激光焊接数值模拟的准确性。图 4、图 5 分别为焊接速度对焊缝宽度、焊缝深度的影响。从图 4~5 可以看出,随着焊接速度增加,焊缝宽度变窄,焊缝深度变小。

表 1 熔池几何尺寸的实验分析与数值模拟验证结果

Tab.1 Validation of the simulated molten pool geometry with experiments

Speed /mm·s <sup>-1</sup>		Weld width /mm	DT/mm	DA/mm
40	Actual	2.05	0.66	0.55
	Calculated	2.18	0.7	0.58
	[Error]	6.34%	6.06%	5.45%
60	Actual	1.86	0.53	0.42
	Calculated	1.89	0.55	0.39
	[Error]	1.6%	3.8%	7%
80	Actual	1.32	0.47	0.36
	Calculated	1.3	0.49	0.34
	[Error]	1.5%	4.3%	5.6%
100	Actual	1.03	0.31	0.25
	Calculated	1.1	0.33	0.27
	[Error]	6.79%	6.45%	8%

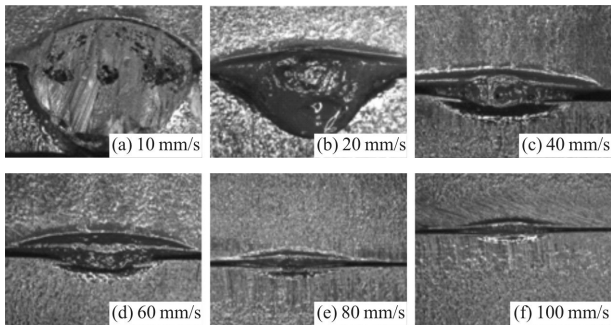


图 4 焊接实验中获得透明和吸收 PC 塑料的熔融深度 (放大倍数为 50 X)

Fig.4 Molten depths in the transparent and absorbing PC obtained in welding experiment(magnification of 50 X)

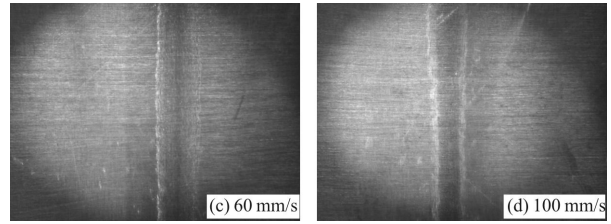
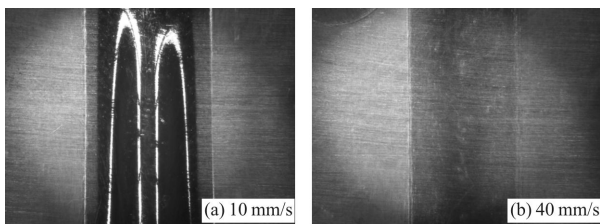


图 5 焊接速度对焊缝显微组织的影响(激光功率为 40 W,透明塑料厚度为 3 mm,放大倍数为 20 X)

Fig.5: Effect of welding speed on weld microstructure(laser power 40 W, transparent part thickness 3 mm, magnification of 20 X)

焊接速度与拉伸强度的关系如图 6 所示。可以看出:随着焊接速度的增大,样品的拉伸强度先增大后减小,在焊接速度为 40 mm/s 时拉伸强度达到最大的 1.3 kN。

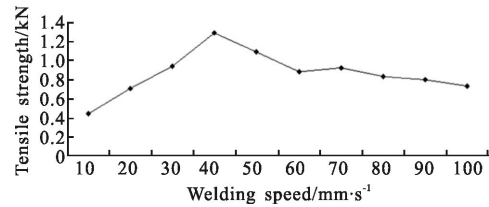


图 6 焊接速度对拉伸强度的影响(激光功率为 40 W)

Fig.6 Tensile load as a function of welding speed(laser power=40 W)

图 7 为焊接速度分别为 20 mm/s 和 30 mm/s 时焊缝横截面的宏观形貌,放大倍数为 200 倍的焊缝显微结构。从图中可以看出,焊接速度为 20 mm/s 时,焊缝中心区出现气孔。

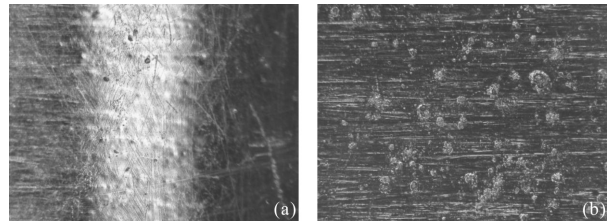


图 7 焊接区域的显微组织(放大倍数 200 X)

Fig.7 Microstructure of welded sample(magnification of 200 X)

## 4 讨论

实验测得焊缝宽度和深度与数值模拟结果进行了比较,图 4 为透明和吸收 PC 塑料的熔融深度,图 5 为焊接速度对焊缝宽度的影响。激光功率为 40 W 时,透明塑料和吸收塑料厚度为 3 mm。在不同焊接速度情况下,给出由实验测量和数值模拟计算的焊缝宽度和焊缝深度,以及实验测值与模拟计算值之

间的百分比误差,如表 1 所示。

激光功率为 40 W, 焊接速度为 40 mm/s 时, 在焊接区域, 数值模拟计算温度达到 333.8 °C, 焊缝宽度为 2.18 mm, 透明塑料和吸收塑料的焊缝深度(DT+DA)为 1.28 mm。而且实验测量得出的焊缝宽度为 2.05 mm, 透明塑料和吸收塑料的焊缝深度(DT+DA)为 1.21 mm。当激光功率为 40 W, 焊接速度为 100 mm/s 时, 在焊接区域, 数值模拟计算温度达到 165.5 °C, 焊缝宽度为 1.1 mm, 透明塑料和吸收塑料的焊缝深度(DT+DA)为 0.6 mm, 实际测量得焊缝宽度约为 1.03 mm, 透明塑料和吸收塑料的焊缝深度(DT+DA)为 0.56 mm。可以看到实验值与数值模拟计算值的误差较小, 激光焊接温度场数学模型的模拟结果, 与实际结果一致。这表明数值模拟方法的准确性。

当激光功率分别为 40 W, 光斑直径 2.5 mm, 焊接速度分别为 10、20、40、80、100 mm/s 时, 在 PC 透明塑料和吸收塑料接触面上温度场的分布, 如图 2 所示。图 6 为焊接速度与拉伸强度的关系。随着焊接速度的增加焊接区域最高温度逐渐降低、焊接宽度和深度变小。焊接速度为 10 mm/s 时, 最高温度达到 589.5 °C 高于 PC 塑料分解温度 500 °C, 而且焊接速度为 10 mm/s 时, 经拉伸试验获得拉伸强度为 0.4 kN。在图 4(a)中可以看到激光辐射能量形成了很深的焊缝, 从图 5(a)可以看到焊缝的不均匀, 焊接区域发生了材料分解, 从而降低了焊接强度。由于激光与 PC 塑料作用时间过长, 能量输入过大使得吸光材料获得足够的热能而发生大量面积熔化, 焊缝熔化不规则, 焊缝宽度迅速增大, 同时焊缝出现气孔, 焊接质量较差。过大的能量输入致 PC 塑料的熔化燃烧, 产生了大量的烟尘。在受热时间较长的情况下发生严重过热降解, 从而损坏了焊缝和塑件表面,

图 7 给出了激光功率为 40 W, 焊接速度分别为 20、30 mm/s)时的焊缝显微结构情况。从图中可以看出, 在焊缝上产生了大量的气泡或气孔, 严重影响焊接质量。由塑料分解引起了气泡或气孔的形成, 在恒定的激光功率的情况下, 塑料分解与焊接速度有关。焊接速度较低时, 激光照射时间过长导致焊接区域过热和降解, 从而降低了焊接强度。焊接强度依赖于焊接样品所吸收的能量, 所以焊接速度较低时, 焊接区域温度明显较高, 焊接强度明显较低。这意味着,

试样吸收的能量决定了该试样的温度值以及焊接强度。这就是热膨胀的值取决于试样温度分布的原因。然而, 焊接强度又取决于热膨胀值。

当焊接速度为 40 mm/s 时, PC 样本的拉断力达到了最大值, 为 1.3 kN, 如图 6 所示, 这时焊接最高温度达到 333.8 °C, 更多的熔融体积形成了, 而且焊缝宽度较宽, 焊缝深度较深(图 4(c))。焊接样品的焊缝处局部放大图如图 5(b)所示, 焊缝均成形良好, 没有出现气孔和未熔合等缺陷。这是由于最佳的能量输入使得更多的能量在聚合物的较大体积内被吸收, 从而导致了更多的热膨胀以及产生了更大的熔融体积。

当焊接速度过高于 40 mm/s 时, 焊接温度较低, 从而 PC 塑料粘合性较弱, 焊接强度较低。在恒定的激光功率, 焊接速度直接影响焊缝直径和其质量。图 5 为不同焊接速度对焊缝宽度影响, 从图中可以看出随焊接速度增大, 焊缝宽度变窄。

另一方面, 在焊接过程中焊接界面的温度较低, 最大温度比 PC 材料的熔融温度范围略高一点, 导致低熔融深度, 从而降低了熔接强度。从图 4 和图 5 可以看出激光焊接速度对焊缝宽度和深度有一定影响。高焊接速度可能会产生两个焊接件之间热量损失或不良的热传导。热量损失产生气孔, 从而降低了焊接强度。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Huizhong, Liu Huixia, Wang Xiao. Experiment research and numerical simulation on laser transmission welding of thermoplastic[D]. Changzhou: Jiangsu University, 2007: 59–77. (in Chinese)  
张惠中, 刘会霞, 王霄. 热塑性塑料激光透射焊接的实验研究与数值模拟 [D]. 常州: 江苏大学, 2007:59–77.
- [2] Liu Huixia, Xing An, Zhang Huizhong. Temperature field simulation on laser transmission welding of polyvinylchloride [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(11): 1801–1807. (in Chinese)  
刘会霞, 邢安, 张惠中. 聚氯乙烯激光透射焊接温度场的有限元模拟[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1801–1807.
- [3] Yang Kun, Wang Xiao, Zhang Huizhong, et al. Influence of additive on welding quality of laser transmission welding plastics [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(3): 246–249. (in Chinese)  
杨昆, 王霄, 张惠中, 等. 吸收剂对热塑性塑料激光透射焊

- 接质量的影响[J]. 激光技术, 2009, 33(3): 246-249.
- [4] Zaka G, Mayboudi L, Chena M, et al. Weld line transverse energy density distribution measurement in laser transmission welding of thermoplastics [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(1): 24-31.
- [5] Devrient M, Da X, Frick T, et al. Experimental and simulative investigation of laser transmission welding under consideration of scattering [J]. *Physics Procedia*, 2012, 39: 117-127
- [6] Bappa Acherjee, Arunanshu S Kuar, Souren Mitra, et al. Experimental investigation on laser transmission welding of PMMA to ABS via response surface modeling [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(5):1372-1383.
- [7] Bappa Acherjee, Arunanshu S Kuar, Souren Mitra, et al. Modeling of laser transmission contour welding process using FEA and DoE [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44 (5): 1281-1289.
- [8] Lei Jianbo, Wang Zhen, Wang Yunshan, et al. Experiment study of laser transmission welding of polymethylmethacrylate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40 (1): 0103006-1-0103006-5. (in Chinese)
- 雷剑波, 王镇, 王云山, 等. 激光透射焊接聚甲基丙烯酸甲酯试验研究 [J]. 中国激光, 2013, 40 (1): 0103006-1-0103006-5.
- [9] Wei Hong, Wang Chuanyang. Technics and performance research of laser transmission welding polycarbonate plastics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(11): 100-103. (in Chinese)
- 韦宏, 王传洋. 聚碳酸酯激光透射焊接工艺及性能研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(11): 100-103.
- [10] Zhang Wei, Zhang Qingmao, Guo Liang, et al. Research on the properties of through-transmission laser welding of polycarbonate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 0703001. (in Chinese)
- 张卫, 张庆茂, 郭亮, 等. 激光透射焊接聚碳酸酯接头性能研究[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0703001.