

# 聚碳酸酯激光透射焊接工艺及性能研究

韦 宏 王传洋

(苏州大学机械工程学院, 江苏 苏州 215021)

**摘要** 在激光塑料透射焊接理论的基础上,采用半导体激光器焊接聚碳酸酯(PC)塑料薄板,研究了激光焊接热塑性塑料的可行性。设计并确定了激光透射焊接的实验方案,包括激光器和焊接材料的选择。通过微观金相实验分析了焊接因素对焊接质量的影响。通过正交实验法研究了激光功率、焊接速度、炭黑含量对焊接质量的影响。结果表明对于聚碳酸酯材料而言,激光功率是影响焊接质量的首要因素,其次是焊接速度,最后是炭黑含量。

**关键词** 激光技术;激光透射焊接;热塑性塑料;焊接参数;微观金相分析

**中图分类号** TG439.4;TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1103003

## Technics and Performance Research of Laser Transmission Welding Polycarbonate Plastics

Wei Hong Wang Chuanyang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China)

**Abstract** Based on the theory of laser transmission welding, the feasibility of laser welding the polycarbonate (PC) sheet plastics is researched. The experimental scheme for laser transmission welding is plotted, which includes the selection of laser equipment and welding materials. Metallographic microscopy is conducted for experimental samples in order to investigate the influence of welding parameters on welding quality. Orthogonal experiment method is used to study the welding results under different conditions of laser power, welding speed and the content of carbon black in polycarbonate. The results show that the laser power is the primary influencing factor, followed by the welding speed, and the last is the content of carbon black.

**Key words** laser technique; laser transmission welding; thermoplastic; welding parameters; metallographic microscopy

**OCIS codes** 140.3070; 140.3390; 106.5470

### 1 引 言

激光焊接技术已广泛应用于金属材料加工领域,其优点早已被各行业所熟知。随着绿色环保理念的深入以及对生产成本控制方面的考虑,塑料被越来越广泛地用来代替一些金属部件,因此,人们期望出现一种更加快速、有效、洁净的塑料焊接方式,而激光焊接塑料技术就完全可以满足这方面的要求。

激光焊接塑料技术是一种新兴的焊接技术,相比外部加热焊接、外加部件胶结连接、注入焊接等传

统塑料焊接方式,它主要有焊接牢固、焊缝紧密、振动应力和热应力小、适应性强等优点<sup>[1]</sup>。近年来,国内外有很多学者对激光透射焊接在热塑性材料上的应用进行了深入的研究。在焊接工艺方面, Haberstroh 等<sup>[2]</sup>研究了焊接塑料微部件所需的最优焊接参数。Chen 等<sup>[3]</sup>研究开发了焊接微流体塑料件系统,该系统精度可以达到 2  $\mu\text{m}$ ,采用非接触式加工,焊接质量很高,同时该系统还具有低成本大批量生产的潜力。David<sup>[4]</sup>提出用衍射激光进行塑料微焊接(焊接尺寸小于 500  $\mu\text{m}$ ),并建立了衍射模

收稿日期: 2011-06-20; 收到修改稿日期: 2011-08-22

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(09KJB460010)和江苏省苏州市国际交流与合作基金(SWH0927)资助课题。

作者简介: 韦 宏(1986—),男,硕士研究生,主要从事机械电子及机械设计等方面的研究。E-mail: whcastle@126.com

导师简介: 王传洋(1972—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事生物材料先进制造技术理论及装备设计、高分子材料加工方法、关键技术及模具创新设计等方面的研究。E-mail: cywang@suda.edu.cn

型。在吸收剂研究方面, Ian<sup>[5]</sup>采用一种吸收红外的染料薄膜来焊接两个透明件,即 Clearweld 方法。王霄等<sup>[6]</sup>讨论了两种吸收剂(黑色薄膜和黑漆涂层)对激光辐射能量吸收性能的影响,并对焊接质量做了对比分析。

综合来看,国外在激光塑料焊接方面的研究比较深入广泛,很多技术已经产业化;而国内对此类课题的研究开展得不多,主要集中在高校和研究所<sup>[7~13]</sup>。

本文对塑料激光焊接的机理和过程进行了深入研究。通过实验和分析,优化工艺参数,达到提高焊接强度和焊接精度的目的,可为塑料激光焊接的广泛应用提供一定的理论和实验依据。

## 2 激光透射焊接原理

激光透射塑料焊接的原理如图 1 所示。通过反射镜、透镜或光纤组成的光路系统将激光束聚焦在待焊接区域,形成热作用区,两个待焊接件保持紧贴,并被施以持续的夹紧力,上层焊接件透光率较高,下层焊接件在激光波长处具有较高的吸收率。光束穿过上层材料到达下层材料表面,由于下层焊接件较高的吸收率从而在其表面吸收较多的能量,使材料表面融化,材料内部分子链扩散产生范德华力。经过足够的冷却,熔融层在接触面固化并形成焊缝,从而紧密地连接在一起<sup>[14]</sup>。

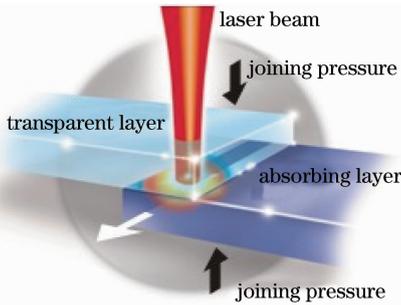


图 1 激光透射塑料焊接原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser transmission welding of plastics

## 3 实验设备、材料及方案

### 3.1 实验设备

实验中所使用的主要设备如下:

- 1) 注塑机: SZ-1300A 型注塑机;
- 2) 透射式激光焊接器: WFD120 型半导体激光器;
- 3) 拉伸试验机: YU-802A 微型冷冲拉伸成型机;

4) 光学显微镜: LEICA DM IRM 显微镜。

### 3.2 实验方案

实验主要考虑 3 个影响因素,分别为激光功率、焊接速度、吸收剂掺杂比例(炭黑含量)。通过正交实验法设计实验过程,选定最佳焊接参数。

### 3.3 试件的制备

聚碳酸酯(PC)是透明的无色或微黄色强韧固体,透明度仅次于聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚苯乙烯(PS),具有良好的综合力学性能,能在较大的温度范围内保持较高的机械强度,且有特别优异的抗冲击性和尺寸稳定性,但是耐疲劳性和耐磨性较差,容易产生应力开裂。实验用 PC 型号为 GE PC241R,其具体参数见表 1。

表 1 PC241R 主要参数

Table 1 Parameters of PC241R

Parameter	Value	Parameter	Value
Density / (g · cm <sup>-3</sup> )	1.2	Water absorbing / %	0.15
Strength / MPa	62.8	Mold shrinkage / %	0.5~0.7
Bending strength / MPa	93.2	Flexural modulus / MPa	2200
Heat deflection temperature (1.81 MPa) / °C	132	Thermal decomposition temperature / °C	340

PC 材料具有水敏感性,其主链中含有酯基,有亲水性,在常温空气中吸水率为 0.15%~0.20%。注塑过程中,水分会严重影响成型后的试件透明度,因此实验前将 PC 颗粒在 120 °C 烘箱中进行 4 h 烘干处理,然后注塑成型,通过掺入质量分数分别为 0.05%、0.10%、0.15% 的炭黑制成 3 种不同透光率的吸收件,将试件切割成尺寸为 120 mm × 25.4 mm × 3.6 mm 的样品。实验参数的配置如表 2 所示。

表 2 实验参数的配置

Table 2 Configuration of experimental parameters

Level	Laser power / W	Welding rate / (mm/s)	Black carbon content / %
1	20	20	0.05
2	25	30	0.10
3	30	40	0.15
4	35	50	0.10
5	40	60	0.15

## 4 实验结果及分析

### 4.1 极差分析

通过正交实验法计算得到样品的拉伸测试数据,选定最优参数,如表 3 所示。表中激光功率、焊接速度和炭黑含量均用表 2 中对应的配置水平序号表示。

表 3 PC 焊接工艺参数极差分析

Table 3 Analysis of PC weld range parameters

Number	Laser power	Welding speed	Black carbon content	Examine indicator (tensile strength) /N
1	1	1	1	134
2	1	2	2	134
3	1	3	3	138
4	1	4	2	61
5	1	5	3	51
6	2	1	2	263
7	2	2	3	261
8	2	3	2	191
9	2	4	3	228
10	2	5	1	40
11	3	1	3	301
12	3	2	2	224
13	3	3	3	289
14	3	4	1	96
15	3	5	2	113
16	4	1	2	384
17	4	2	3	269
18	4	3	1	167
19	4	4	2	259
20	4	5	3	270
21	5	1	3	434
22	5	2	1	244
23	5	3	2	379
24	5	4	3	350
25	5	5	2	165
$K_1$	518	1516	518	
$K_2$	983	1132	2115	
$K_3$	1023	1164	2187	
$K_4$	1349	994		
$K_5$	1572	639		
$k_1$	103.6	303.2	103.6	
$k_2$	196.6	226.4	211.5	
$k_3$	204.6	232.8	218.7	
$k_4$	269.8	198.8		
$k_5$	314.4	127.8		
Range	210.8	175.4	115.1	
Best	5	1	3	

从表 3 可知,激光功率因素最优的是第 5 水平,焊接速度因素最优的是第 1 水平,炭黑含量因素最优的是第 3 水平,即焊接功率为 40 W,焊接速度为 20 mm/s,下层 PC 试件的炭黑质量分数为 0.15%。对比实验表可知,最优实验即为实验 21,拉伸力为 434 N,是 25 组实验中的最大值。

激光功率因素的极差最大,说明激光功率的改

变对实验指标的影响最大。因此,激光功率是需要考虑的主要因素;其次是焊接速度。极差最小的是吸收剂的炭黑含量,说明吸收剂炭黑对实验影响最小。

#### 4.2 焊接速度对拉伸力的影响

图 2 给出当激光功率为 40 W 时焊接速度对焊接件拉伸力的影响。从图中可以看出,拉伸力和焊接速度虽然不呈绝对线性关系,但是总体来说随着焊接速度的增大,拉伸力呈减小趋势,也就是说,激光功率一定时,随着焊接速度的增大,焊接强度减小。原因是当激光功率大小适中时,相对较低的焊接速度可以使焊接材料吸收足够的能量并将其转化成热量,有利于材料的熔融,从而形成强度较高的焊缝。

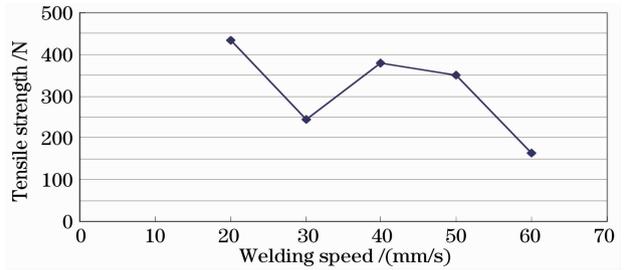


图 2 激光功率为 40 W 时,焊接速度对拉伸力的影响

Fig. 2 Effect of welding speed on tensile strength when the laser power is 40 W

#### 4.3 不同参数下焊缝的优劣对比

以上分析均针对焊接强度进行。但焊缝质量不能等同于焊接强度。限于篇幅,在此仅给出实验 21 (激光功率 40 W,焊接速度 20 mm/s,炭黑质量分数 0.15%) 和实验 23 (激光功率 40 W,焊接速度 40 mm/s,炭黑质量分数 0.1%) 焊缝质量的对比,如图 3 所示。

在所有焊接样品中,在激光功率适当的情况下,焊接速度较小时的焊接强度都比较高。图 3(a)虽然焊接强度值最高,拉伸力达 434 N,但由于焊接速度较慢,焊缝流浆多且有明显热分解;在同样的焊接功率下,图 3(b)采用的焊接速度更为合适,局部放大 100 倍后可以看出焊缝边缘清晰,质量较好。

### 5 结 论

1) 在激光塑料透射焊接理论的基础上,采用半导体激光焊接 PC 塑料薄板,研究了激光焊接 PC 的可行性,证实了激光焊接是一种效果比较理想的塑料焊接方法。

2) 对 PC 焊接件进行了破坏性拉伸实验和显微

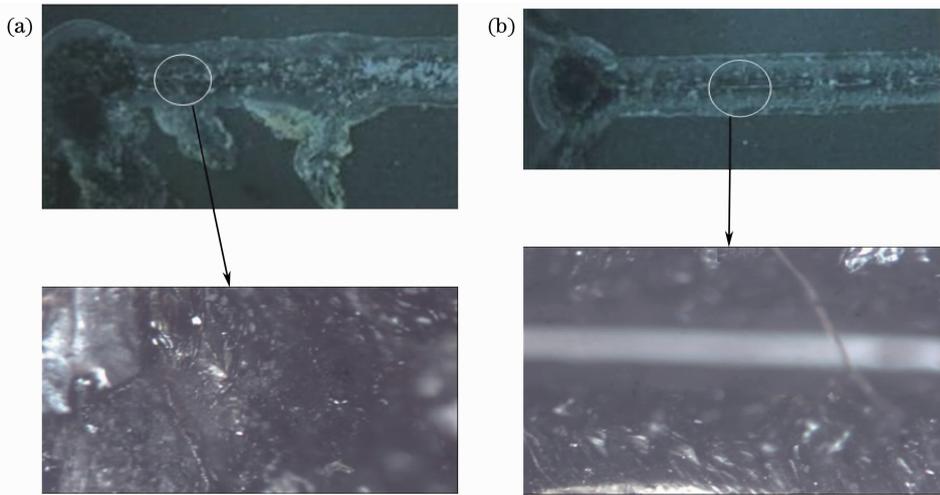


图 3 (a)实验 21 与(b)实验号 23 的试件焊缝表面显微对比

Fig. 3 Microscopic comparison of the welding section in (a) experiment 21 and (b) experiment 23

观测实验,结果表明,激光功率是首要影响因素,其次是焊接速度,最后是炭黑含量。

3) 观察试件焊缝的外部形貌可知,在一定优化参数下可以得到较为优良的焊缝,焊缝洁净且没有卷边和气孔。拉伸测试结果表明,所得的焊缝焊接强度可以满足一定的力学要求。实验表明激光塑料透射焊接可以应用到一些要求较为严格的部件上。

### 参 考 文 献

- 1 Zhou Xingjian. Economical and effective plastic welding process [J]. *World Plastics*, 1996, (2): 39~41  
周兴键. 经济有效的塑料焊接工艺[J]. 国外塑料, 1996, (2): 39~41
- 2 E. Haberstroh, W. M. Hoffmann, R. Poprawe *et al.*. Laser transmission joining in micro-technology [J]. *Microsyst. Technol.*, 2006, (11): 43~51
- 3 Chen Jiewei, Zybko Jerry, Clements James. Diode laser bonding of planar MEMS, MOEMS, and microfluidic devices [C]. Warrendale: Materials Research Society Symposium Proceedings, 2005. 309~316
- 4 Grewell David. Modeling of Molecular Healing for Micro-Laser Welding of Plastics with Diffractive Optical Elements as Spatial Modulators[D]. Columbus: Ohio State University, 2005. 2~4
- 5 Jones Ian. Laser welding for plastics components[J]. *Assembly Automation*, 2002, **22**(2): 129~135
- 6 Wang Xiao, Zhang Huizhong, Ding Guomin *et al.*. Investigation on influence of additive on welding quality of laser transmission welding plastics[J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(4): 314~317  
王 霄, 张惠中, 丁国民 等. 吸收剂对激光塑料透射焊接质量影响的研究[J]. 应用激光, 2007, **27**(4): 314~317

- 7 L. S. Mayboudi, M. Chen, G. Zak *et al.*. Characterization of beam profile for high-power diode lasers with application to laser welding of polymers[C]. ANTEC 2006, 2006. 2274~2278
- 8 Liu Huixia, Xing An, Zhang Huizhong *et al.*. Temperature field simulation on laser transmission welding of polyvinylchloride[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1801~1807  
刘会霞, 邢 安, 张惠中 等. 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
- 9 Wang Jianchao, Qin Liming, Li Jiao. Technics and microcosmic analysis research of PMMA/ABS thermoplastic laser transmission welding [J]. *Applied Laser*, 2008, **28**(4): 287~291  
王健超, 秦丽明, 李 娇. PMMA/ABS 热塑性塑料激光透射焊接工艺研究及微观分析[J]. 应用激光, 2008, **28**(4): 287~291
- 10 Wang Xiao, Zhang Huizhong, Ding Guomin *et al.*. Laser transmission welding polypropylene plastics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 466~471  
王 霄, 张惠中, 丁国民 等. 聚丙烯塑料激光透射焊接工艺[J]. 中国激光, 2008, **35**(3): 466~471
- 11 I. A. Jones, P. A. Hilton, R. Sallavanti *et al.*. Use of infrared dyes for transmission laser welding of plastics [C]. Proc. ICALEO, 1999. 71~79
- 12 Y. Kurosaki, K. Satoh, H. Koyasunagi *et al.*. CO<sub>2</sub> laser welding of the PFA disk top on a circular tube assisted by a transparent solid heat sink[C]. Chicago: ANTEC 2009, 2009. 1283~1288
- 13 E. Vegte, M. Gurp, H. Hoekstra *et al.*. Engineering plastics for laser welding[C]. Ohio: ANTEC 2007, 2007. 1894~1899
- 14 Yuan Hui, Lai Jianjun, He Yungui. Experimental study on laser welding of thermoplastics [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(1): 18~21  
袁 晖, 赖建军, 何云贵. 热塑性塑料的激光焊接实验研究[J]. 光学与光电技术, 2005, **3**(1): 18~21

栏目编辑: 宋梅梅