

# PMMA 激光穿透焊接的实验研究

焦俊科 江桦锐 周广兵 白小波

(广州中国科学院工业技术研究院, 广东 广州 511458)

**摘要** 为了研究塑料激光穿透焊接的物理机理,了解焊接参数对塑料激光穿透焊接质量的影响,寻找不同条件下的最佳焊接参数,利用波长为 1064 nm 的光纤激光在多功能加工平台上对厚度为 3 mm 的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 进行穿透焊接的实验研究。对焊接过程中的物理现象进行了分析,对不同激光功率、光斑半径、焊接速度下的焊接质量进行了比对,找到了这些参数对焊接质量的影响规律,并得到了几种特定条件下的最佳焊接参数。利用拉力测试仪对焊件进行了拉力测试,结果显示,焊缝的强度高于母材的强度。

**关键词** 激光技术;塑料焊接;激光穿透焊接;光纤激光;PMMA 塑料

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.051401

## Experimental Study on Laser Transmission Welding of PMMA

Jiao Junke Jiang Huarui Zhou Guangbing Bai Xiaobo

(Institute of Industry Technology, Guangzhou and Chinese Academy of Sciences,  
Guangzhou, Guangdong 511458, China)

**Abstract** To investigate the physical principle of laser transmission welding of plastics, comprehend the effect of welding parameters on the welding quality, find out the optimum welding parameters and improve the quality of plastic transmission welding, an experimental investigation of transmission welding of polymethyl methacrylate (PMMA) with 1064 nm fiber laser is carried out on the fiber laser material processing system. The physical phenomena in the welding process are analyzed, the welding quality for different welding parameters such as laser power, laser diameter and welding speed is compared. The influencing law of welding parameters on the welding quality and the optimum welding parameters under special condition are found out. The welding piece is tested by a pull testing unit. The result shows that the strength of the welding seam is higher than that of base material.

**Key words** laser technique; plastic welding; laser transmission welding; fiber laser; PMMA plastic

**OCIS codes** 140.3070; 140.3390; 140.6810

## 1 引言

从 20 世纪 70 年代大功率 CO<sub>2</sub> 激光用于材料加工开始,西方国家的一些学者就已着手利用激光进行塑料加工的研究<sup>[1]</sup>。当时,主要是利用连续波 CO<sub>2</sub> 激光对塑料薄膜进行打孔、焊接和切割,而且由于激光器费用昂贵,激光塑料焊接无法和传统的塑料粘接技术相竞争,该技术发展较为缓慢。到 20 世纪 90 年代中期,随着激光技术的发展,焊接所需要的激光设备价格大幅下降,塑料激光焊接技术得到了长足的发展,英国焊接学会、德国的帕德博恩大学和亚琛塑料加工技术研究所以及美国明尼苏达大学等众多的国外学术研究机构对塑料焊接的焊接理论、焊接工艺、激光微焊接等方面都进行了深入广泛的研究,为塑料激光焊接技术的发展与工业推广奠定了基础<sup>[2~10]</sup>。近年来,欧洲的 Leister、Rofin、Bielomatik、Branson 等公司及美国的相干公司等相继推出各种不同技术的专门用于塑料焊接的激光设备,特别是瑞士的 Leister 公司开发了一种 Golob 焊接技术<sup>[11]</sup>,并集成一套无需夹具夹持的焊接系统,为塑料焊接技术从二维平面向三维空间发展奠定了基础。

从 21 世纪初开始,国内的一些高校和研究所对塑料激光焊接技术进行了研究<sup>[12~18]</sup>,主要集中在焊接工

**收稿日期**: 2012-12-15; **收到修改稿日期**: 2013-01-06; **网络出版日期**: 2013-04-08

**作者简介**: 焦俊科(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事激光加工技术及激光加工设备方面的研究。

E-mail: jameshust@sina.com

艺和数值模拟上,与国外存在一定的差距。本文在前期研究的基础上<sup>[19]</sup>,采用波长为 1064 nm 的光纤激光对聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料进行穿透焊接,对焊接过程中的物理现象进行分析,对不同焊接参数下的焊接质量进行比较,找到了最佳的焊接参数,并通过拉力测试仪对焊接强度进行了测试分析。

## 2 焊接原理

塑料对不同波长的激光有着不同的透射率,从图 1 中可以看出<sup>[20]</sup>,PMMA 以及其他常见热塑性材料对波长处于 600~1200 nm 的激光的透射率较高,即利用这一波段的激光进行穿透焊接较为合适,本文选用波长为 1064 nm 的光纤激光作为 PMMA 的焊接光源。

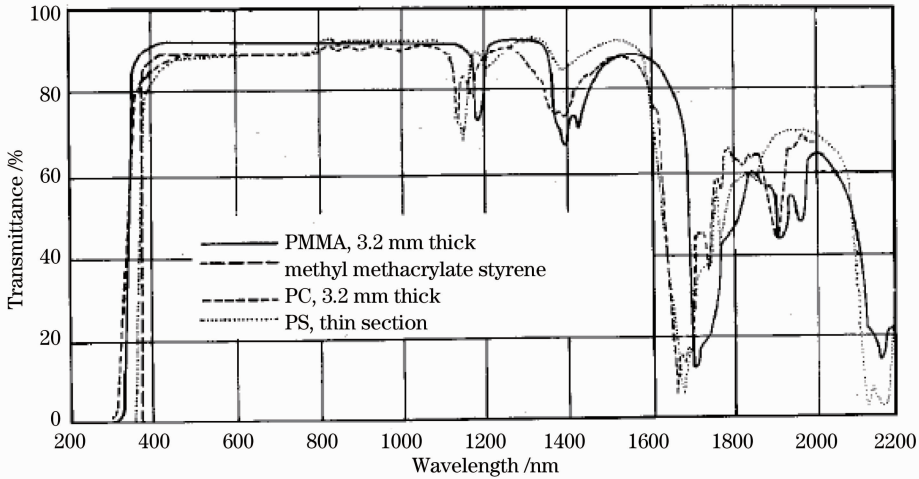


图 1 常见热塑性塑料对不同波长激光的透射率

Fig.1 Transmittance of some plastics to laser with different wavelengths

塑料激光穿透基本原理如图 2 所示,将两块热塑性塑料在焊接夹具作用下夹紧在一起,波长为 1064 nm 的光纤激光束穿过上层塑料制品,被下层涂有吸收剂或有色塑料制品吸收,吸收的激光能量转化为热能,使塑料的接触面熔化,进而在范德华力的作用下形成一个焊接区,通过按特定路径移动激光束完成塑料工件的焊接。

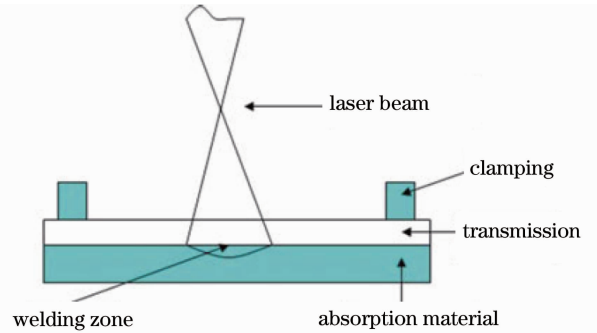


图 2 塑料激光穿透焊接原理图

Fig.2 Schematic of laser transmission welding of plastics

## 3 实验装置

实验是在多功能光纤激光加工平台上进行的,该平台由 SPI 200 W 光纤激光器、ABB 六轴工业机器人、气流系统、中央控制系统及自主开发的软件系统构成,能够进行多种金属、非金属材料的平面和三维切割和焊接。

为了方便实验,设计制作了塑料焊接二维工装系统,能够对焊接时的夹具压力进行实时调节。

实验系统结构图如图 3 所示。焊接的基本过程为:把待焊接的塑料工件放进气动夹具装置,调节气压使夹具夹紧塑料焊件,而后启动多功能光纤激光加工系统进行焊接。激光头固定在机器手的末端,中央控制系统控制机器手按照既定路径进行运动,焊接参数通过人机交互界面进行设置,并写入数据库,操作人员通过人机交互界面对整个系统进行控制、监控。

选择厚度为 3 mm 的 PMMA 材料(参数见表 1)作为焊接对象,上层为透明 PMMA,以保证激光能穿透该层,下层为黑色不透明 PMMA,以吸收穿透过来的激光能量。焊接完成后,通过拉力测试仪对焊接质量进行比较分析,找到合适的焊接参数。

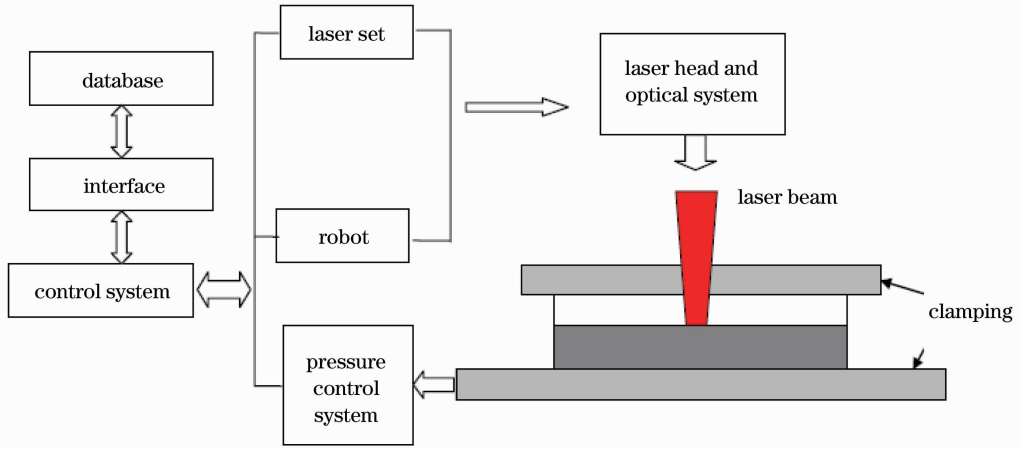


图3 实验系统

Fig. 3 Experimental system

表1 PMMA 物理参数

Table 1 PMMA physical parameters

Density / ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Vitrification temperature / $^{\circ}\text{C}$	Thermolysis temperature / $^{\circ}\text{C}$	Specific heat capacity / ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Thermal conductivity / ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Young modulus /GPa	Poisson ratio	Linear expansion coefficient / $\text{K}^{-1}$
1186~1190	100~118	270	1900	0.194~0.196	$3.16\times 10^9$	0.32	$8.3\times 10^{-5}$

## 4 实验分析

图4是塑料激光穿透焊接的实验图,两块待焊接的PMMA板用工装夹具固定,激光头在机器人控制下沿着上夹具(透明玻璃)表面直线运动,完成焊接。

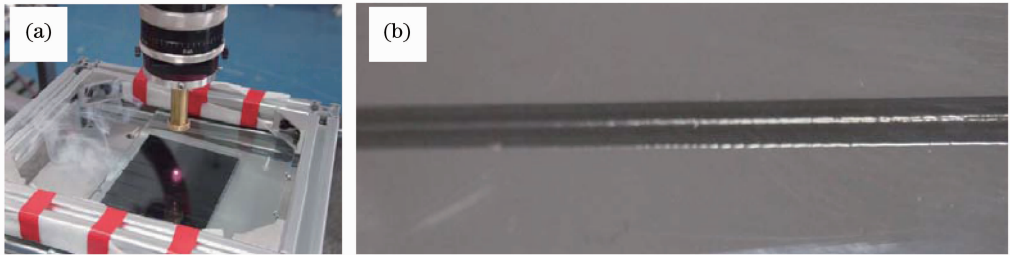


图4 (a) PMMA激光穿透焊接; (b) 焊缝

Fig. 4 (a) Laser transmission welding of PMMA; (b) welding seam

在焊接过程中,由于激光较高的功率密度导致塑料的熔化燃烧,产生了大量的烟尘,烟尘会沿着与焊接方向相反的熔化路径排出,在焊缝上留下一条排烟通道(图4),一定程度上影响到焊接的强度。排烟通道的大小与焊接时产生烟雾的多少有关,激光的能量密度越大,焊接时熔化燃烧产生的烟雾越多,排烟通道越大。因此,焊接时应选择合适的能量密度,在保证焊接深度的同时,尽量减少产生的烟雾量。

在PMMA激光穿透焊接过程中,激光功率、光斑大小和焊接速度对焊接质量的影响较大,下面分析这些参数对焊接质量的影响。

### 4.1 光斑大小的影响

图5是塑料激光穿透焊接时的激光光路图。塑料焊接过程中,光斑的大小直接决定着焊缝的宽度。而在实验过程中,测量实际的光斑大小 $D$ 比较困难,一般都是通过控制离焦量 $h$ 来控制光斑的大小,满足 $D/W = h/L$ , $W$ 和 $L$ 分别为入射光束直径和透镜焦距,而 $h = H - h_1$ ,一般情况下,可以通过寻找焦点的位置来确定 $h_1$ ,在不改变聚焦镜位置的情况下 $h_1$ 是一个定值,因此可以通过测量焊接嘴到工件之间的距离 $H$ 得到光斑的大小,满足 $D = W(H - h_1)/L$ 。在本激光系统中, $L = 100\text{ mm}$ , $W = 5\text{ mm}$ , $h_1 = 2\text{ mm}$ ,因此,光斑大小 $D$ 与

$H$  的关系满足  $D = H/20 - 0.1$  (mm)。

图 6 给出了激光功率为 20 W, 焊接速度为 20 mm/s, 距离  $H$  分别为 50、40、30 mm(从上到下), 光斑直径  $D$  约为 2.4、1.9、1.4 mm 时的焊接效果。

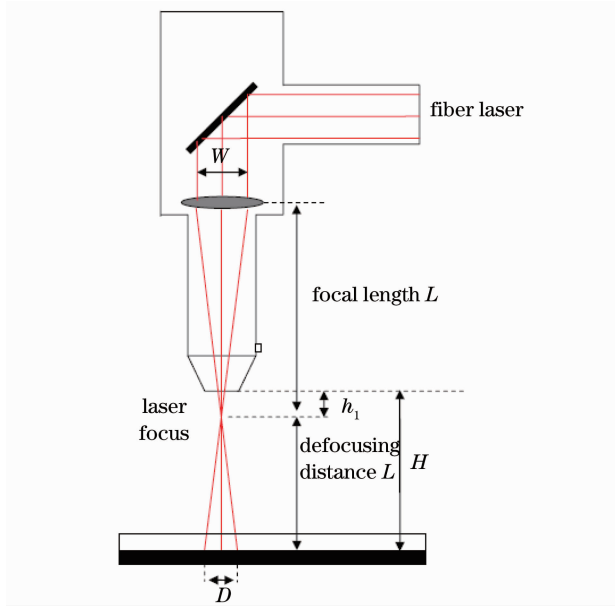


图 5 焊接光路示意图

Fig. 5 Optical path of laser transmission welding

距离为 50 mm 时, 由于激光功率密度较小, 焊缝上塑料熔化不够充分, 不能形成排烟通路, 因此产生的少量烟雾不能及时排除, 滞留在焊缝上, 形成很多的烟雾气泡, 焊接质量很差, 强度很低。距离为 40 mm 时, 激光能量密度增大, 形成了排烟通路, 但烟雾并没有完全排净, 仍有少部分来不及排出塑料而已经凝固, 阻塞排烟通路, 在排烟通路周围依然有少量气泡。距离为 30 mm 时, 焊接质量大为改观, 气泡明显减少, 但焊接结束后会形成一条明显的排烟通路。

另外, 从图中可以看出, 随着焊接距离的减小, 焊缝宽度在逐渐减小, 焊接强度逐步增强。随着距离的进一步减小, 光斑进一步变小, 激光功率密度变大, 焊缝宽度变小, 熔化深度增加, 产生的烟雾量也进一步增加, 会形成一个更宽更深的排烟通道, 同样会影响到焊接的强度。因此, 对于特定激光功率和焊接速度, 存在一个最佳的焊接距离。通过实验比对, 在激光功率为 20 W, 焊接速度为 20 mm/s 的情况下, 最佳的焊接距离为 32 mm。

#### 4.2 激光功率的影响

图 7 给出的是高度  $H = 50$  mm, 焊接速度  $v = 20$  mm/s, 从左到右激光功率依次为 20、30、40、50、60、80、100 W

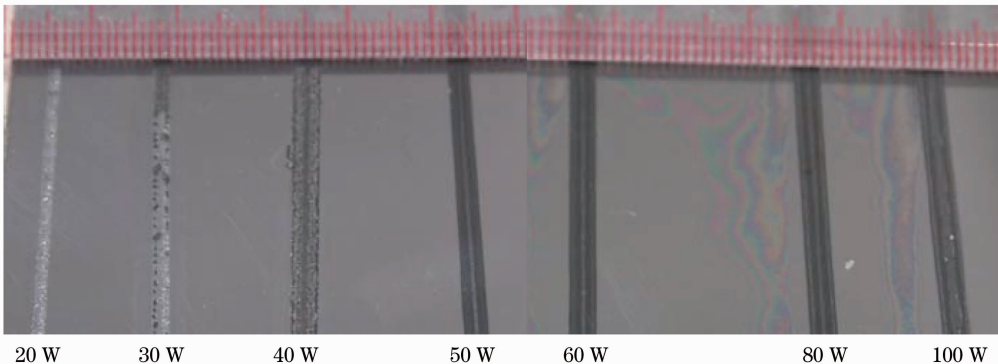


图 7 不同功率下的焊接效果

Fig. 7 Welding result of PMMA with different laser powers

100 W 时的焊接效果。从图中可以看出,当激光功率小于 40 W 时,焊缝上有大量的气泡,这是由于激光功率过低,塑料没能充分熔化,产生的烟雾没有及时排除的缘故。当功率大于 50 W 时,塑料在高能量密度激光的作用下充分熔化,能够形成排烟通路,使焊接产生的烟雾及时排出,焊缝质量较好。随着激光功率的增大,焊接时产生的烟雾越来越多,形成的排烟通道也更大,当功率达到 100 W 时,排烟通道的宽度几乎占据了整个焊缝的一半,影响到焊接的强度。因此,要达到好的焊接效果,必须寻找一个合适的激光功率,既能使烟雾及时排出,又不会使排烟通路太大。从图中可以看出,在高度  $H=50\text{ mm}$ ,焊接速度  $v=20\text{ mm/s}$  的情况下,功率在 50 W 左右比较合适。

#### 4.3 焊接速度的影响

图 8 给出了  $H=50\text{ mm}$ 、功率  $P=50\text{ W}$ ,速度分别为 30、20、10、5 mm/s(从左到右)时的焊接情况。从图中可以看出,速度过低时( $v=5、10\text{ mm/s}$ ),由于激光与 PMMA 作用时间过长,导致排烟通道过大,而且焊缝熔化不规则,焊缝较宽,焊接质量较差;速度过高时( $v=30\text{ mm/s}$ ),激光与 PMMA 作用时间过短,塑料不能充分熔化,产生的烟雾不能及时排出,在焊缝上产生了大量的气泡,严重影响焊接质量。当焊接速度在 20 mm/s 时,焊接效果较好,既能及时排除产生的烟雾,排烟通道又不是太大。

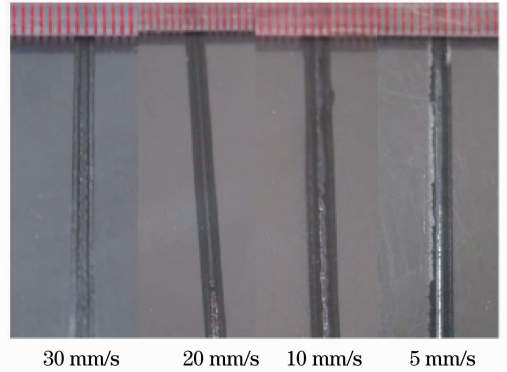


图 8 不同速度下的焊接效果

Fig. 8 Welding result of PMMA with different velocities

#### 4.4 焊接强度的测试实验

通过不同参数下的实验,找到了几组比较好的焊接参数,图 9(a)从左到右的焊接参数依次为: $H=50\text{ mm}$ 、 $v=5\text{ mm/s}$ 、 $P=15\text{ W}$ ;  $H=50\text{ mm}$ 、 $v=10\text{ mm/s}$ 、 $P=30\text{ W}$ ;  $H=50\text{ mm}$ 、 $v=20\text{ mm/s}$ 、 $P=50\text{ W}$ 。利用一组比较好的焊接参数( $H=50\text{ mm}$ 、 $v=10\text{ mm/s}$ 、 $P=30\text{ W}$ )进行 PMMA 的环焊,焊接情况如图 9(b)所示。

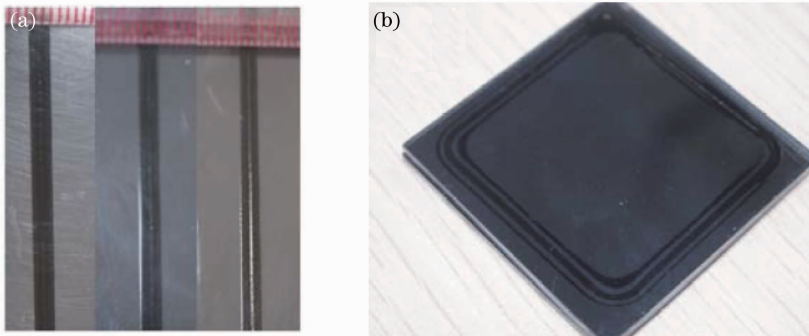


图 9 (a) 3 组焊接质量较好的焊缝; (b) PMMA 环焊

Fig. 9 (a) Three pieces with good welding quality; (b) circle welding of PMMA

采用拉力测试仪对焊接强度进行测试,如图 10 所示,把塑料焊接工件夹持在拉力测试仪上,启动拉力测试仪,通过其自带软件观测拉力的变化情况。

从图中可以看出,在拉力逐步增大的过程中,拉力曲线先缓慢增长,而后突然减小至零,这是因为在拉力增大的过程中 PMMA 板先缓慢变形而后完全断裂的缘故,断裂的最大拉力为 2600 N。PMMA 板的断裂是从母材上断裂而非焊缝处,因此焊接强度大于母材的强度。

## 5 结 论

在多功能光纤激光加工平台上进行了 PMMA 的激光穿透焊接实验研究,分析了焊接过程中的物理现象,比较了不同焊接参数下的焊接质量,得到了以下结论:

1) PMMA 激光穿透焊接的焊接强度与焊缝材料的熔化量以及烟雾量的大小有密切关系,一般情况下



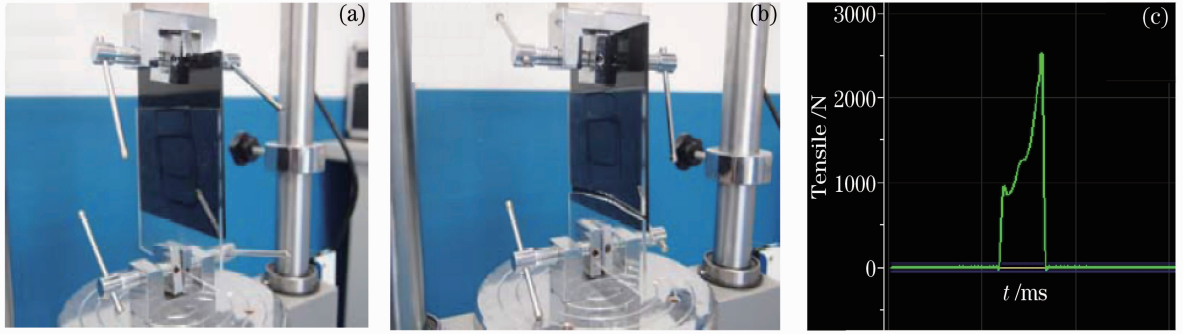


图 10 PMMA 焊件的拉力测试。(a)拉伸前;(b)拉伸后;(c)拉力变化曲线

Fig. 10 Welding piece tensile test of PMMA. (a) Before the tensile; (b) after the tensile;  
(c) tensile change in the test

熔化量越大,焊件结合越紧密,焊接强度越高;烟雾量越大,排烟通道越大,焊缝的焊接强度越低。因此焊接过程中应合适地控制熔化量与烟雾量。

2) 焊缝材料的熔化量和烟雾量与光斑半径、激光功率、焊接速度等参数有着密切的关系。一般情况下,光斑半径越小,焊缝材料的熔化深度和熔化量越大,同时烟雾量也越大;激光功率越大,熔化量越大,同时烟雾量也越大;焊接速度越慢,熔化量越大,同时烟雾量也越大。

3) 在既定条件下,存在一个最佳的焊接参数,既能保证熔化量充足,又能保证排烟量不是太大。通过实验,找到了针对 3 mm 厚 PMMA 的几组较好的焊接参数。

4) 对 PMMA 激光穿透焊接的焊件进行拉力测试,结果显示焊缝强度大于母材的强度,激光穿透焊是塑料焊接的一种理想的方法。

### 参 考 文 献

- 1 H. J. Silvers, Jr., S. Wachtell. Perforating, Welding and Cutting Plastic Films with a Continuous CO<sub>2</sub> Laser [R]. University Park; PA State University Engng. Proc., 1970. 88~97
- 2 J. P. Coelho, M. A. Abreu, M. C. Pires. High-speed laser welding of plastics films [J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2000, **34**(4~6): 385~395
- 3 Sato Kimitoshi, Kurosaki Yasuo, Saito Takushi *et al.*. Laser welding of plastics transparent to near-infrared radiation [C]. *SPIE*, 2002, **4637**: 528~536
- 4 R. Prabhakaran, M. Kontopoulou. Contour laser-laser transmission welding of glass reinforced nylon 6 [J]. *Thermoplastic Composite Material*, 2006, **19**(4): 427~439
- 5 E. Haberstroh, W. M. Hoffmann, R. Poprawe *et al.*. Laser transmission joining in micro-technology [J]. *Microsyst. Technol.*, 2006, **12**(7): 43~51
- 6 L. S. Mayboudi, A. M. Birk, G. Zak *et al.*. Laser transmission welding of a lap-joint: thermal imaging observations and three-dimensional finite element modeling [J]. *J. Heat Transfer*, 2007, **129**(9): 1177~1186
- 7 Giuseppe Casalino, Elhem Ghorbel. Numerical model of CO<sub>2</sub> laser welding of thermoplastic polymers [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2008, **207**(1~3): 63~71
- 8 Elhem Ghorbel, Giuseppe Casalino, Stephane Abed. Laser diode transmission welding of polypropylene: geometrical and microstructure characterization of weld [J]. *Materials and Design*, 2009, **30**(7): 2745~2751
- 9 Bappa Acherjee, Dipten Misra, Dipankar Bose. Prediction of weld strength and seam width for laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2009, **41**(8): 956~967
- 10 Jon Fold von Bulow, Kim Bager, Carsten Thirstrup. Utilization of light scattering in transmission laser welding of medical devices [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **256**(3): 900~908
- 11 Jiewen Chen, Carsten Thielen. Golob-welding [J]. *Laser Technology Journal*, 2004, **2**(10): 35~38
- 12 Yuan Hui, Lai Jianjun, He Yungui. Experimental study on laser welding of thermoplastics [J]. *Optics and 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试验研究[J]. *光学与光电技术*, 2005, **3**(1): 18~21
- 13 Wang Youliang, Cui Ying, Wang Jianchao *et al.*. Technology of laser welding plastic [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(2):

93~96

王又良, 崔 瑛, 王健超 等. 塑料的激光焊接工艺[J]. 应用激光, 2006, **26**(2): 93~96

- 14 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

- 15 Liu Huixia, Zhang Huizhong, Ding Guomin. Research on laser transmission welding HDPE [J]. *J. Materials Engineering*, 2008, (11): 13~18

刘会霞, 张惠中, 丁国民 等. HDPE激光透射焊接工艺的研究[J]. 材料工程, 2008, (11): 13~18

- 16 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 姣. 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

- 17 Wang Xiao, Yang Kun, Zhang Huizhong *et al.*. Experiment research on laser transmission welding of two different thermoplastics [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, **30**(5): 97~100

王 霄, 杨 昆, 张惠中 等. 两种不同热塑性塑料之间的激光透射焊接试验[J]. 焊接学报, 2009, **30**(5): 97~100

- 18 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

- 19 Jiao Junke, Bai Xiaobo, Wang Xinbing. Finite element analysis of PMMA laser transmission welding [J]. *Laser Technology*, 2011, **35**(4): 456

焦俊科, 白小波, 王新兵. PMMA激光穿透焊接的有限元分析[J]. 激光技术, 2011, **35**(4): 456

- 20 V. A. Kagan, R. Bray, A. Chambers. Forward to better understanding of optical characterization and development of colored polyamides for the infrared/laser welding: part I: efficiency of polyamides for infrared welding [J]. *J. Reinforced Plastics and Composites*, 2003, **22** (6): 533~547