

激光透射焊接聚甲基丙烯酸甲酯试验研究

雷剑波 王 镇 王云山 张传鹏

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

摘要 采用 YAG 激光透射焊接聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)板材,对其工艺、焊接区形貌和拉伸性能进行了研究。结果表明:在未添加吸光剂条件下,激光功率高于 200 W 时,透明和黑色 PMMA 板激光透射焊接性能良好,上层透明 PMMA 材料的激光入射面无烧蚀损伤,拉伸试验中透明 PMMA 板断开,焊接区无开裂,最大载荷为 2110 N。激光功率低于 200W 时,单道焊接条件下焊接区被拉开,最大载荷 1170N。透明 PMMA 板和其他颜色 PMMA 板在焊接时,需要添加吸光剂。采用黑色热塑性丙烯酸树脂为吸光剂的条件下,焊接效果较好。

关键词 激光技术;激光透射焊接;热塑性塑料;微观形貌

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0103006

Experiment Study of Laser Transmission Welding of Polymethylmethacrylate

Lei Jianbo Wang Zhen Wang Yunshan Zhang Chuanpeng

(Laser Engineering Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract Experiments on YAG laser transmission welding of polymethylmethacrylate (PMMA) specimens are carried out to study laser welding technology, microstructure of welding zone and tensile property. The results show that transparent and black PMMA specimens can be well welded and there is no ablated mark at laser irradiated surface without optical absorbing material when laser power is above 200 W. In tensile experiments, the transparent PMMA specimens break at the edge of welding zone with the maximum load of 2110 N, and there is no crack at the welding zone. When laser power is below 200 W, the welding zone is fractured under the condition of single track welding, and the maximum load is 1170 N. Optical absorbing material can be used to improve the reliability of laser transmission welding of transparent and color PMMA specimens. The quality of laser transmission welding with black thermoplastic acrylic resin is better than that of other absorbing materials.

Key words laser technique; laser transmission welding; thermoplastic; microstructure

OCIS codes 140.3070; 140.3390; 180.5810

1 引 言

因模具尺寸和结构限制,越来越多的复杂塑料部件需将多个零件连接在一起,利用激光完成两层或多层塑料焊接成为国内外研究热点^[1,2]。Van de Ven 等^[3]研究了激光功率、焊接速度、夹持力等工艺参数对激光透射焊接聚氯乙烯塑料的影响。Mayboudi 等^[4]利用有限元方法求解得到激光焊接塑料中三维瞬态温度场分布,并与热成像结果进行对比。Geiger 等^[5]通过对无定型和半结晶热塑性塑

料的光学和热力学特性进行分析,研究了激光能量传递过程。Torrisi 等^[6]针对激光焊接塑料中热、光化学和离子注入三种机制引入的影响,较全面地研究了其微观作用过程。

我国在此方面也开展了较多工作,袁晖等^[7]建立了半导体激光焊接系统,分析了不同颜料的有机玻璃材料焊接的可行性,并对其焊接强度进行了测试。王又良等^[8]研究了半导体激光焊接塑料工艺、质量和激光能量密度分布。张卫等^[9]采用半导体端

收稿日期: 2012-07-31; 收到修改稿日期: 2012-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(60908017)、天津市科技支撑计划重点项目(11ZCKEG02500)和天津市应用基础及前沿技术研究计划(12JCQJNC02800)资助课题。

作者简介: 雷剑波(1981—),男,副教授,主要从事激光制造理论及其应用等方面的研究。E-mail: ljbjt@163.com

抽运全固态(DPSS)激光焊接塑料,试验表明焊缝内部分层和气孔是影响接头力学性能和断裂机制的主要原因。刘会霞等^[10]采用参数化设计语言(APDL)编程实现了高斯型热源的动态加载,得到了激光透射焊接透明聚氯乙烯的温度场分布。黄冬林等^[11]利用光纤激光振镜扫描焊接塑料,研究了间距和扫描速度对焊接强度的影响。

国内外相关研究表明,激光透射焊接塑料的主要研究领域包括焊接机理、工艺和组织性能等方面^[12~14]。其难点在于塑料的激光焊接与金属材料焊接不同,不同塑料颜色、材料、工艺参数和吸光剂等条件下有较大差异。本文主要研究透明聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)与不同颜色 PMMA 材料的焊接

工艺及其对焊接质量的影响,重点对未添加吸光剂条件下透明和黑色 PMMA 材料焊接区形貌和拉伸强度开展研究。

2 试验材料及方法

选用透明 PMMA 与红色、黄色、白色、绿色、黑色 5 种有色 PMMA 板材进行焊接。当用非黑色 PMMA 时,需用吸光剂,吸光剂采用黑色热塑性丙烯酸树脂和偶氮有机颜料。以透明 PMMA 板作为上下加紧板,把塑料焊接试件夹持在其中,如图 1 所示,激光功率为 100~400 W,速度为 10 mm/s,光斑尺寸为 3~10 mm。

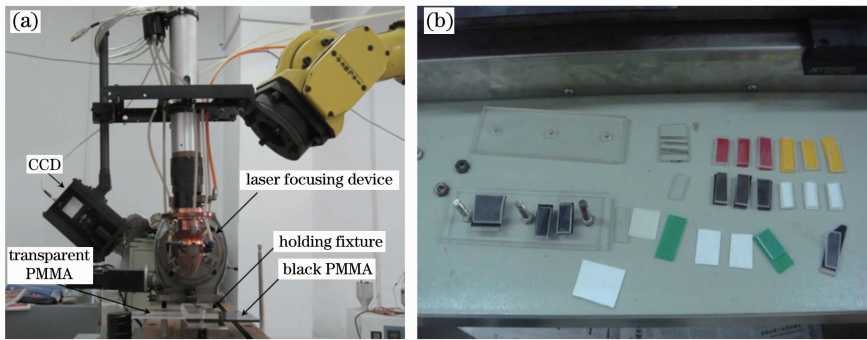


图 1 激光透射焊接试验图。(a)焊接现场;(b)试验试件

Fig.1 Experimental pictures of laser transmission welding. (a) Welding site; (b) experiment specimens

试验装置主要包括:

- 1) 激光器:NCLT CW-1000W 固体 Nd:YAG 激光器;
- 2) 机器人:FANUC R-2000iB/125L 机器人;
- 3) 显微镜:S4800 冷场发射电子显微镜;
- 4) 拉伸试验机:WE-30 液压式万能材料试验机。

采用冷场发射电子显微镜拍摄焊接区微观形貌,试样选用 3 mm 厚透明与黑色 PMMA 板材焊接而成,未添加吸光剂,分析前需将焊接试样用液氮脆

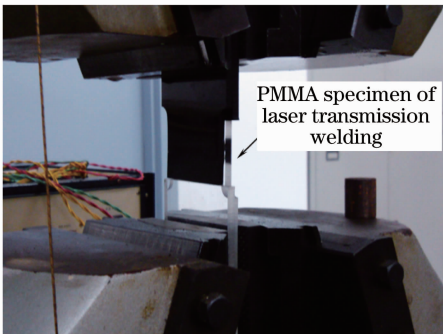


图 2 拉伸试验图

Fig.2 Picture of tensile experiment

断,取其横截面喷金。

拉伸试样采用长为 136 mm、宽为 60 mm、厚为 3 mm 的透明和黑色 PMMA 板材搭接焊而成,图 2 为采用液压式万能材料试验机做拉伸测试,焊接后的两块 PMMA 板不在同一平面上,拉伸时加等厚辅助板夹持,保证拉伸在一条直线上。

3 结果及分析

3.1 不同颜色塑料焊接

未采用吸光剂时,对透明 PMMA 板与其他颜色板材焊接效果进行研究。试验表明,在一定夹持力下,透明 PMMA 板与红色、绿色、黄色材料无法形成焊接,与白色材料虽可焊接在一起,但结合强度很低,与黑色材料可形成强度较好的焊接;所有焊接样件的透明 PMMA 材料边缘有一定烧蚀,而激光入射面均无烧蚀痕迹。下层材料为红色 PMMA 时正面(激光入射面)和背面(激光透射面)形貌如图 3 所示,焊接结合面呈现部分微熔[见图 3(a)],而背面烧蚀非常严重[见图 3(b)],表明在红色材料内部存在强烈的激光透射和相互作用过程。

为了研究吸光剂对 PMMA 塑料板材焊接效果的影响,分别以黑色热塑性丙烯酸树脂和黑色偶氮有机颜料作为吸光剂进行对比试验。试验表明,采用黑色热塑性丙烯酸树脂作为吸光剂时,焊接质量

良好,试样焊接处无明显缺陷,在试样背面无烧蚀现象。而采用黑色偶氮有机颜料作为吸光剂时,由于焊接过程中其不能直接融入基体,虽能焊接在一起,但焊接质量一般。

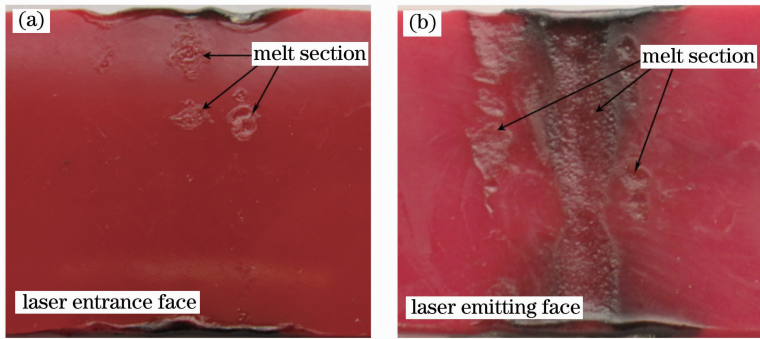


图 3 激光焊接透明-红色 PMMA 试件。(a)正面;(b)背面

Fig. 3 Specimen of laser welding of transparent-red PMMA plastics. (a) Front; (b) back

3.2 激光透射焊接区形貌

图 4 为在未加吸光剂条件下,透明 PMMA 板和黑色 PMMA 板焊接区的微观形貌。由放大 100 倍、1000 倍的照片可以看出,两块塑料板被焊接后存在一条明显的焊接线,表明焊接效果良好,热影响区域较小;对焊接线部分进行高倍放大(10000 倍)后发现,由于两块塑料主要成份均为 PMMA,为

非晶高聚物,两者间具有非常好的相容性,熔融焊接后,以相互交错熔合在一起的结构存在,表明焊接区整体特征良好,体现出激光焊接塑料良好的稳定性。图 4(a)中可发现焊接区右侧存在多处凹坑,这是由于冷场发射电子显微镜的电子激发黑色 PMMA 板中的色素粒子所造成。

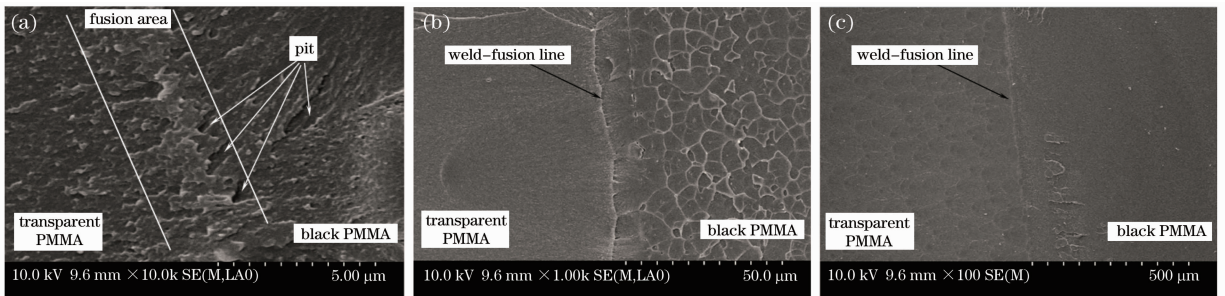


图 4 激光透射焊接结合界面电子扫描显微组织图。(a) 10000 倍;(b) 1000 倍;(c) 100 倍

Fig. 4 Photographs of laser transmission welding zone microstructure. (a) 10000 times; (b) 1000 times; (c) 100 times

3.3 拉伸试验

参考 JB4744-2007 承压设备产品焊接试件的力学性能检验标准,对透明与黑色 PMMA 板材激光透射焊接试件进行拉伸测试,图 5 为拉断后断口照片。激光功率高于 200 W 时,拉伸所选用的试件均是透明 PMMA 被拉断,断口在焊接区边缘处。

表 1 为拉伸测试数据,已测试结果为不同工艺条件下拉开或拉断时所需要的力。激光功率为 200 W、单道焊接时,透明与黑色 PMMA 板被拉开,两块板均无裂痕,表明焊接强度比较低,焊接区在 1170 N 拉力作用下就被拉开;激光功率为 200 W、双道焊接时,透明 PMMA 板在焊接区边缘断开;激光功率高于 200 W 时,无论单道焊接还是双道焊

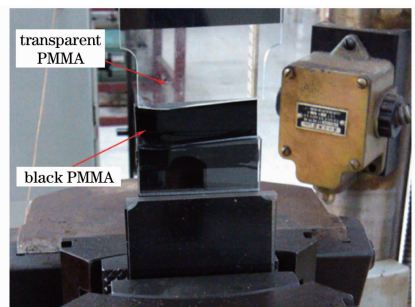


图 5 激光透射焊接试件拉断图

Fig. 5 Photograph of experimental specimen in tensile test

接,均是透明 PMMA 板断开,透明 PMMA 板的拉伸极限在 2000 N 左右。

按照原有激光透射焊接试件尺寸制作了 PMMA 母材试件(透明与黑色各 3 件),进行拉伸试验,透明 PMMA 试件拉断时拉力分别为 3.62、3.86、3.29 kN,

平均值为 3.59 kN;黑色 PMMA 试件拉力分别为 3.38、3.80、3.97 kN,平均值为 3.72 kN。

表 1 拉伸测试数据表

Table 1 Experimental data of tensile test

Number	Power /W	Process velocity /(mm/s)	Distance /mm	Spot diameter /mm	Track	Measured value /N
TH101	200	10	250	10	single	1170
TH102	200	10	250	10	double	2100
TH103	300	10	250	10	double	1780
TH104	300	10	250	10	single	1990
TH105	400	10	250	10	single	2110

拉伸试验存在两种结果:一种为焊接结合面脱离,如图 6(a)所示,此时两焊接试件尺寸完整,在拉力作用下结合区分离,拉力测量值为焊接结合力,分析拉伸失效形式可知,激光功率较低时,试件熔融结合不充分,使得结合强度低;另一种为透明 PMMA

板被拉断,如图 6(b)与(c)所示,断裂位置出现在焊接区边缘,且拉断时的拉力值明显低于母材本身,表明由于焊接区边缘的残余应力,使得焊接区边缘材料强度明显降低。

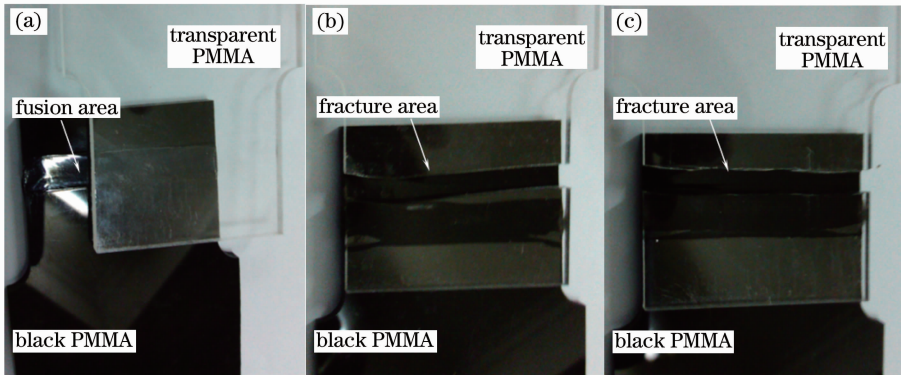


图 6 不同激光功率焊接试件拉断后断口形貌。(a) 200 W; (b) 300 W; (c) 400 W

Fig. 6 Fracture morphology images of specimens at different powers. (a) 200 W; (b) 300 W; (c) 400 W

4 结 论

1) 采用 YAG 激光对 PMMA 热塑性材料进行了透射焊接,焊接质量受材料、激光功率、速率、离焦量与夹持力等因素影响。在扫描速度和激光功率等工艺参数相同的情况下,焊接质量与材料本身颜色有关,黑色材料具有较高的吸光率。

2) 以黑色热塑性丙烯酸树脂为吸光剂时,焊接质量良好,焊接区无明显缺陷,试样背面无烧蚀;而以黑色偶氮有机颜料为吸光剂时,能形成有效焊接,但焊接质量较差。

3) 透明与黑色 PMMA 板材在无吸光剂条件下焊接效果良好,热影响区小,焊接结合区上下两层材料相容性较好,无明显气孔和杂质缺陷。拉伸试验表明受到残余应力影响,焊接区边缘材料强度明显降低,进一步研究应分析残余应力机制,采取消除应力的措施,降低残余应力对材料强度的影响。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Wei Hong, Wang Chuanyang. Technics and performance research of laser transmission welding polycarbonate plastics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1103003
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): 1103003
- 3 James D. Van de Ven, Arthur G. Erdman. Laser transmission welding of thermoplastics-part II: experimental model validation [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2007, **129**(9): 859~867
- 4 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]. *Journal of Heat Transfer*, 2007, **129**(9): 1177~1186
- 5 M. Geiger, T. Frick, M. Schmidt. Optical properties of plastics and their role for the modeling of the laser transmission welding process[J]. *Prod. Eng. Res. Devel*, 2009, **3**(1): 49~55

- 6 L. Torrisi, F. Caridi, A. M. Visco *et al.*. Polyethylene welding by pulsed visible laser irradiation[J]. *Applied Surface Science*, 2011, **257**(7): 2567~2575
- 7 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
- 8 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
- 9 Zhang Wei, Zhang Qingmao, Guo Liang *et al.*. Research on the properties of through-transmission laser welding of polycarbonate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0703001
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
- 10 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
- 11 Huang Donglin, Yang Yongqiang, Yang Shengnan *et al.*. Study on galvanometer scanning fiber laser welding plexiglass technology[J]. *China Plastics Industry*, 2009, **37**(9): 43~45
黄冬林, 杨永强, 杨胜男等. 振镜扫描式光纤激光焊接有机玻璃工艺研究[J]. *塑料工业*, 2009, **37**(9): 43~45
- 12 L. S. Mayboudi, A. M. Birk, G. Zak *et al.*. Finite volume model for laser-soot interaction for laser transmission welding process[J]. *Journal of Laser Applications*, 2010, **22**(1): 22~28
- 13 Zhang Cheng, Wang Xiao, Wang Kai *et al.*. Optimization of weld strength for laser transmission welding of thermoplastic based on response surface methodology and genetic algorithm-artificial neural network[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1103006
张 成, 王 霄, 王 凯等. 基于响应曲面和遗传算法-人工神经网络的热塑性塑料激光透射连接强度的优化[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1103006
- 14 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

栏目编辑:宋梅梅