

激光透射焊接塑料实验研究

四 库 陈盛贵 林勇州

东莞理工学院机械工程学院, 广东 东莞 523808

摘要 为了研究焊接参数(如激光功率、焊接速度)对激光透射焊接塑料强度以及显微结构的影响,采用YAG激光器(功率为300 W,波长为1064 nm)进行聚碳酸酯(PC)材料的激光透射焊接。然后,利用万能材料试验机对焊接后的试件进行拉伸测试,最后利用光学显微镜对焊缝进行微观结构观察,测量焊缝宽度,分析焊缝质量。结果表明,透明PC塑料厚度在1~3.5 mm之间,透射率变化不明显。随着激光能量输入从0.27 J/mm增加到1 J/mm,焊接强度增加;当激光能量输入超过1 J/mm后,焊接强度开始减小。当透明塑料厚度为3.5 mm、激光功率为40 W、焊接速度为40 mm/s时,拉断力可达到峰值1.3 kN。为了提高焊接强度,应严格控制激光能量输入。

关键词 激光技术;激光材料加工;塑料焊接;焊接强度;热塑性塑料

中图分类号 TG456.7 **文献表示码** A **doi**: 10.3788/LOP51.051404

Experimental Investigation on Laser Transmission Welding of Thermoplastic

Sekou Singare Chen Shengui Lin Yongzhou

School of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong 523808, China

Abstract The effect of the laser welding parameters such as laser power, welding speed on weld strength and microstructure is investigated. A 300 W YAG laser with wavelength of 1064 nm is used to weld the transparent and absorbing polycarbonate (PC) in a lap weld configuration. The force at break of the lap welds is assessed on the universal testing machine. The weld fracture surfaces and weld cross-sections are visualized using polarized light microscopy to qualitatively assess the weld quality. The result shows that for transparent PC plastic thickness between 1 mm and 3.5 mm, the transmittance does not change significantly and the part thickness usually has little influence on transmittance. The weld strength shows a clear increase with the line energy increasing. The weld strength reaches a maximum when the line energy raises to about 1 J/mm and then starts to fall off. A peak tensile strength of 1.3 kN is obtained with transparent part thickness of 3.5 mm, laser power of 40 W and welding speed of 40 mm/s. It is concluded that in laser welding of thermoplastic material, the heat input should be strictly controlled to improve the welding strength.

Key words laser technique; laser materials processing; plastic welding; weld strength; thermoplastic

OCIS codes 140.3390; 160.5470; 180.6900

1 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需要一种更加快速、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^[1-18]。

本文在前期研究的基础上,采用波长为1064 nm的300 W固体Nd:YAG激光器,对聚碳酸酯(PC)材料进

收稿日期: 2013-11-11; 收到修改稿日期: 2013-12-30; 网络出版日期: 2014-04-29

基金项目: 广东省产学研结合项目(2012B091000012)、东莞市高等院校科研机构科技计划项目(2011108101002, 2012108101001)

作者简介: 四 库(1971—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事激光焊接技术与快速成型制造方面的研究。

E-mail: singarese@gmail.com

行焊接,重点针对透明塑料和未添加吸收剂的黑色塑料研究激光焊接工艺参数对焊接质量的影响。

2 试件的制备

根据所需要的焊接塑料规格,加工了注塑模具[图1(a)],将模具安装在注塑机上[图1(b)],然后注塑成焊接塑料板(图2)。焊接材料:1)透明PC,长度为60 mm,宽度为30 mm,厚度为1~3.5 mm;2)未添加吸收剂的黑色PC,长度为60 mm,宽度为30 mm,厚度为3 mm。

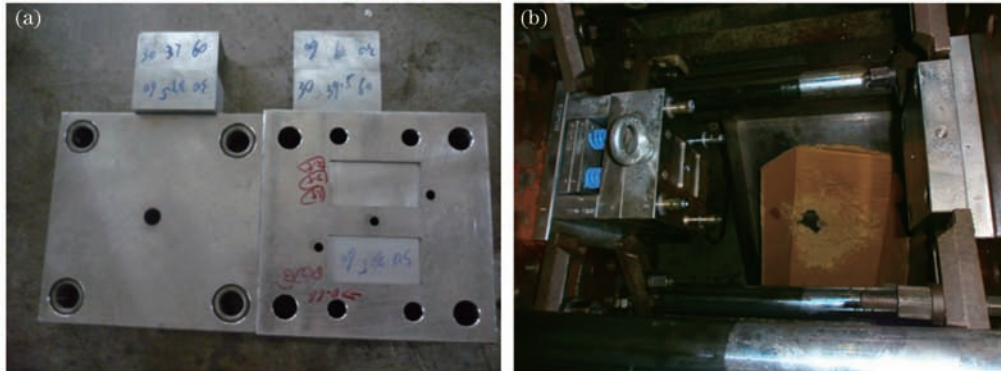


图1 (a)模具镶块;(b)模具安装在注塑机上

Fig.1 (a) Mould insert; (b) mold is mounted on injection molding machine



图2 焊接塑料板

Fig.2 Welding plastic parts

3 激光焊接工艺试验

用于透射率试验的透明PC塑料有6种厚度(1、1.5、2、2.5、3、3.5 mm)。为了保证实验材料的可行性,利用透射率测量装置(Coherent® PM10 10 W power meter)对不同厚度的透明PC塑料进行透射率测量。

本试验所用激光器为Nd:YAG激光器,功率为300 W,波长为1064 nm。采用搭接焊形式(图3)研究激光器平均功率、焊接速度以及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

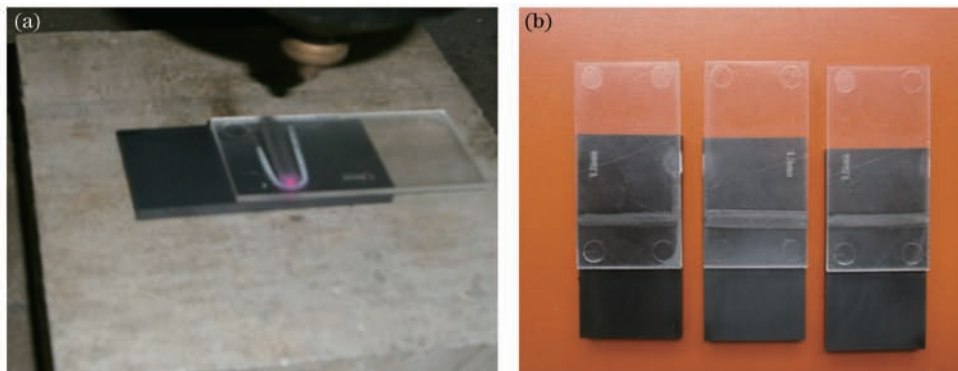


图3 激光焊接塑料过程和试件焊接样品

Fig.3 Laser welding plastic process and weld specimens

焊缝形貌观察和焊缝宽度测试。

4 实验分析

表1为PC塑料的透射率测量结果。可以看出,透明PC塑料厚度在1~3.5 mm之间时,透射率变化不明显。

表1 PC塑料的透射率

Table 1 Transmittance measurement of PC

Transparent part thickness /mm	Transmittance /%
1	94.5
1.5	94
2	93
2.5	92
3	91.7
3.5	91

4.1 焊接速度的影响

1) 焊接速度对焊缝宽度的影响

图4给出了激光功率为40 W,透明塑料厚度为1 mm,焊接速度分别为30、40、50、60、80、100、110、120、160 mm/s时的焊接情况。从图4可以看出,焊接速度对焊缝厚度和焊缝宽度有明显的影响。当焊接速度增加时,材料在单位面积内获得的能量减少,可熔化的区域也相应减小,所以焊缝厚度和焊缝宽度都减少。图5为焊接速度分别为40 mm/s和80 mm/s时焊缝横截面的宏观形貌。从图5可以看出,焊接速度为40 mm/s时,焊缝呈现较均匀的“O”型,当焊接速度为80 mm/s时,焊缝呈现两侧宽、中间窄的“X”型,焊缝厚度明显变窄。

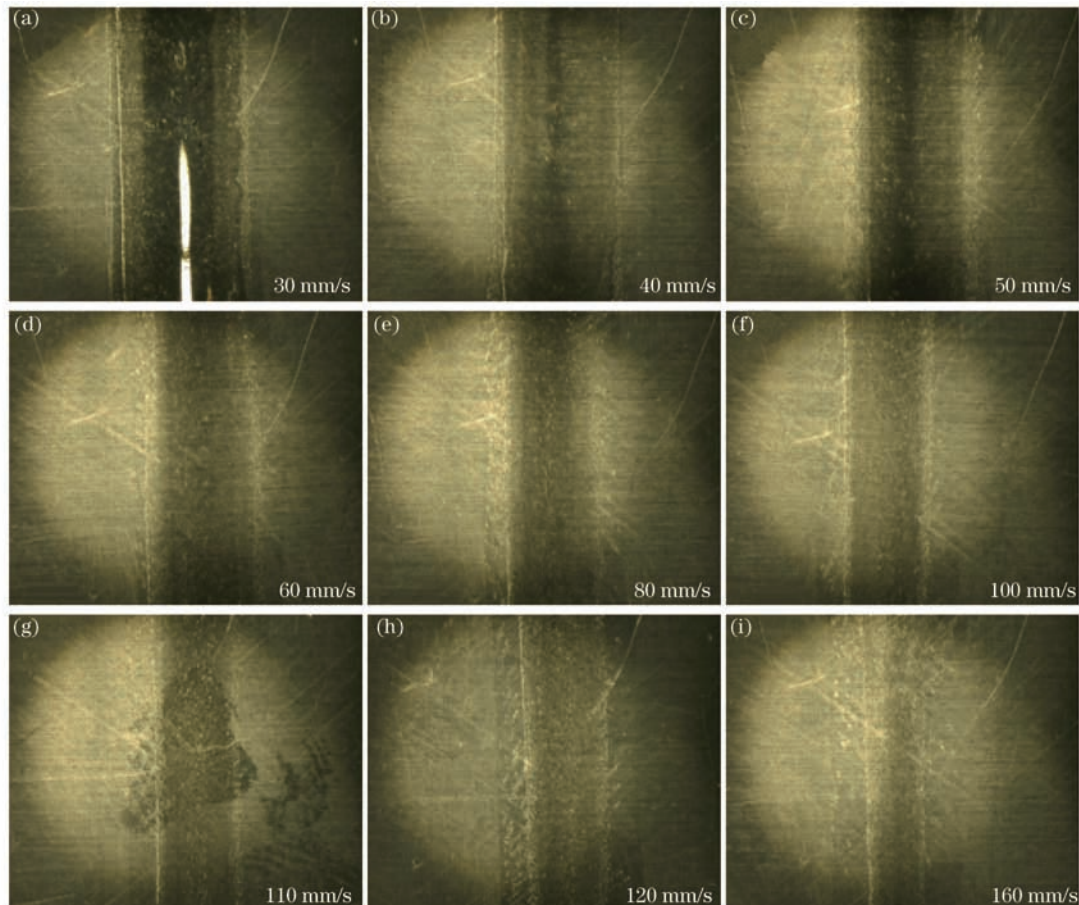


图4 激光功率为40 W,透明塑料厚度为1 mm时,不同焊接速度对焊缝宽度的影响

Fig.4 Effect of different welding speeds on weld width with laser power of 40 W and transparent part thickness of 1 mm

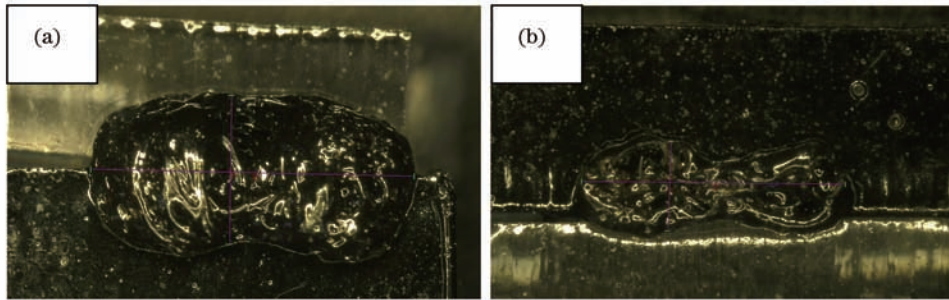


图5 焊接速度对焊缝深度的影响,激光功率为40 W,放大倍数 $x=50$ 倍。(a) 40 mm/s; (b) 80 mm/s

Fig.5 Effect of welding speed on weld depth with laser power of 40 W and magnification x of 50. (a) 40 mm/s; (b) 80 mm/s

在焊接过程中,激光功率为40 W,焊接速度过低时(10 mm/s),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。过大的能量输入导致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,如图6所示。



图6 焊接速度10 mm/s时的焊缝

Fig.6 Weld seam for welding speed of 10 mm/s

图7为激光功率为40 W,焊接速度分别为40、100、120、140 mm/s的情况下,放大倍数为100倍的焊缝显微结构。从图中可以看出,当焊接速度为80 mm/s时,焊缝较均匀,没有发现气孔等焊接缺陷。当焊接速度为100 mm/s时,焊缝出现气孔。当焊接速度在120~140 mm/s范围变化时,塑料不能充分熔化,在焊缝上产生了大量的气孔,严重影响焊接质量。由此可见,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。

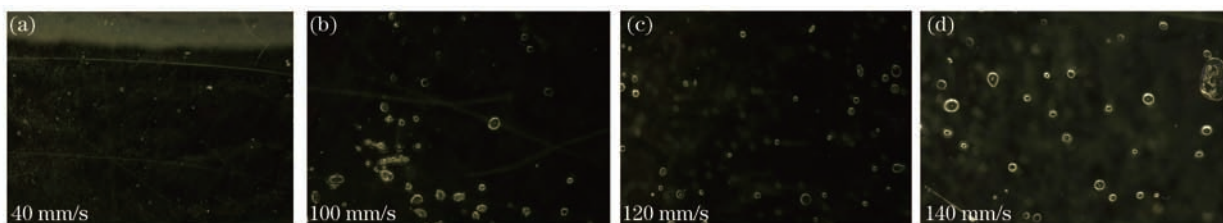


图7 激光功率为40 W时不同焊接速度对焊缝显微结构的影响

Fig.7 Effect of welding speed on weld microstructure with laser power of 40 W

2) 焊接速度对焊接强度的影响

图8为激光功率为40 W时焊接速度对拉伸强度的影响。其中横坐标表示焊接速度,纵坐标表示拉伸强度。从图8可以看出,随着焊接速度的逐渐增大,样品的拉断力先增大后减小。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。

4.2 激光功率的影响

1) 激光功率对焊接强度的影响

图9为焊接速度40 mm/s时,激光器平均功率对拉伸强度的影响,其中横坐标为激光器平均功率,纵坐标为拉伸强度。可以看出,随着激光器平均功率的逐渐增大,样品的拉断力先增大后减小。当激光功率低于20 W时,能量输入过小使得吸光材料没有获得足够的热能而发生熔化,出现未熔合,两板不能被焊合。当

激光功率在 20 ~ 30 W 变化时,焊接接触面吸收的能量不足,导致焊接强度不高。当激光功率在 30 ~ 40 W 之间时,焊缝成形良好,PC 样品的拉断力均在 0.9 ~ 1.3 kN 之间,属于高强度区,而且透明塑料厚度为 3.5 mm 和激光器平均功率为 40 W 时,PC 样本拉断力达到峰值,为 1.3 kN,焊接效果最佳,焊缝成型良好,未出现明显焊接缺陷,如图 10 所示。当激光功率为 50 W 时,过大的能量输入使焊缝中心的温度达到了 PC 的热分解温度,出现热分解、烧蚀,并形成少量气泡或气孔,焊接强度均在 0.7 kN 以下,属于低强度区,如图 11 所示。当激光功率为 60 W 时,焊缝中心出现严重热分解和烧蚀,并形成大量气泡或气孔。这是因为激光器平均功率较高时,焊接接触面吸收了过多的能量,引起了材料的分解,使得焊接强度降低,如图 12 所示。

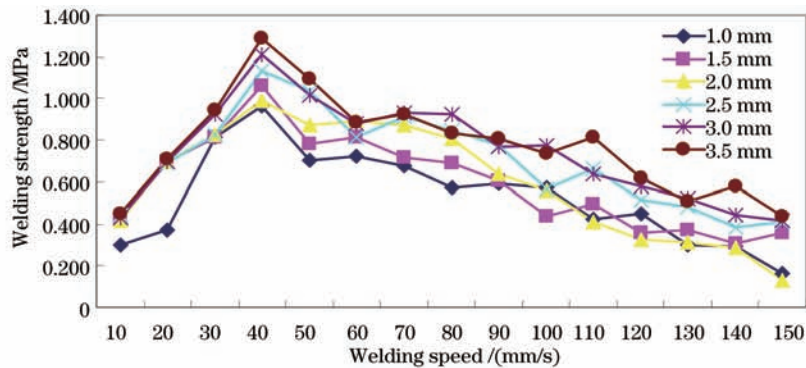


图 8 激光功率为 40 W 时焊接速度对拉伸强度的影响

Fig.8 Effect of welding speed on tensile strength with laser power of 40 W

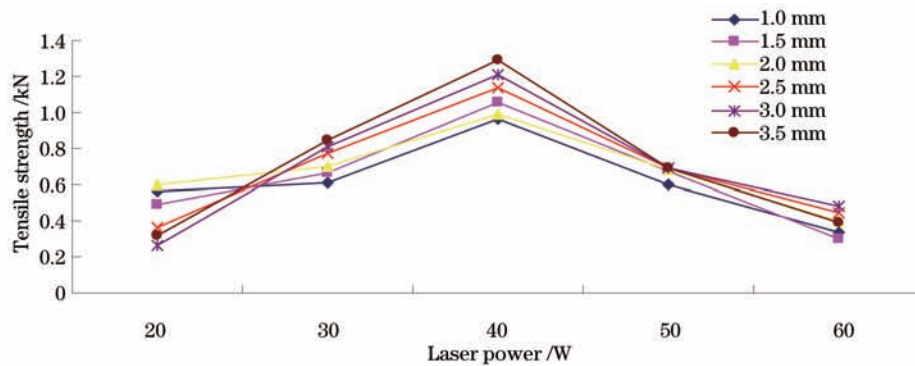


图 9 激光功率对焊接强度的影响

Fig.9 Laser power versus tensile strength

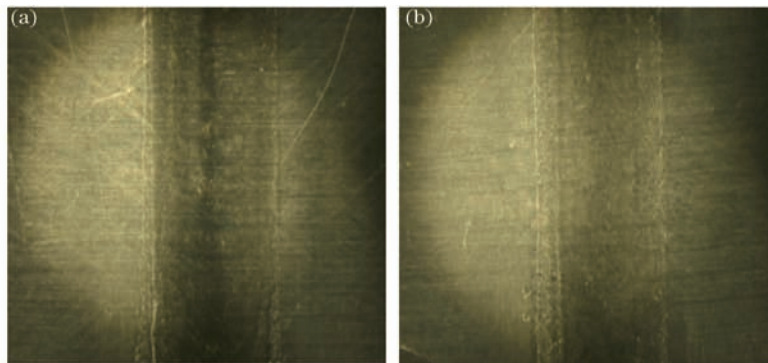


图 10 激光功率为 40 W 时透明塑料厚度为 (a) 1 mm 和 (b) 1.5 mm 时的焊缝微观结构

Fig.10 Weld microstructure of different transparent part thicknesses of (a) 1 mm and (b) 1.5 mm with laser power of 40 W

2) 激光功率对焊缝显微结构的影响

为了更好地研究在高激光功率的情况下焊接强度下降的原因,采用显微镜观察不同激光功率的焊缝。图 10、11 和 12 是焊接速度为 40 mm/s 时,不同的激光功率下的实验结果。从图 10 可以看出,当激光功率为 40 W 时,焊缝较均匀。从图 11 可以看出,当激光功率为 50 W 时,焊缝中心区出现塑料分解。从图 12 可以看出,当激光功率为 60 W 时,焊缝中心区出现严重塑料分解。

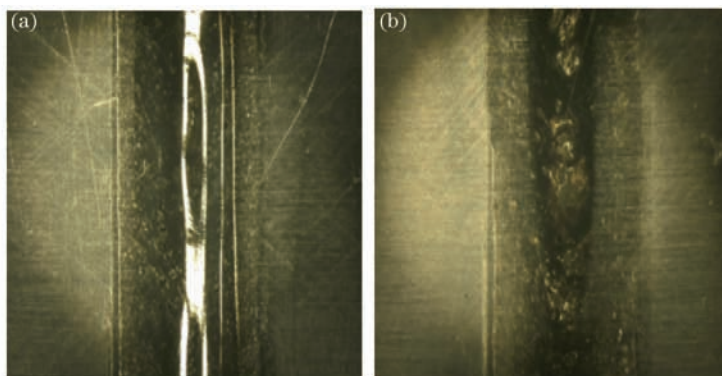


图 11 激光功率为 50 W 时透明塑料厚度为(a) 1 mm 和(b) 1.5 mm 时的焊缝微观结构

Fig.11 Weld microstructure of different transparent part thicknesses of (a) 1 mm and (b) 1.5 mm with laser power of 50 W

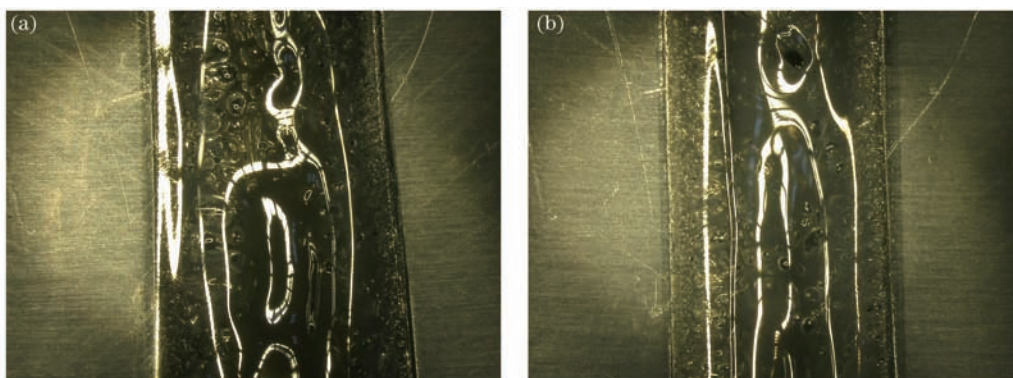


图 12 激光功率为 60 W 时透明塑料厚度为(a) 1 mm 和(b) 1.5 mm 时的焊缝微观结构

Fig.12 Weld microstructure of different transparent part thicknesses of (a) 1 mm and (b) 1.5 mm with laser power of 60 W

4.3 焊接热输入对焊缝形成的影响

改变激光功率和焊接速度会引起单位焊缝长度上激光能量输入即热输入的变化。图 13 为透明塑料厚度为 1 mm 时,激光能量输入对焊接强度的影响。从图 3 可以看出,当焊接热输入在 0.27 ~ 1 J/mm 之间时,焊接强度从 0.16 kN 增加到 0.961 kN。当焊接热输入超过 1 J/mm 后,焊接强度开始减小。过低的激光能量输入(激光功率较低或焊接速度较快)会导致两个塑料之间的加热不足,限制了分子扩散,从而降低了焊接强度。激光能量输入过高时,聚合物会发生热降解,导致强度降低。选择合适的能量输入时,在两个塑料之间可以得到足够的加热能量,这样可以得到较好的焊接质量。

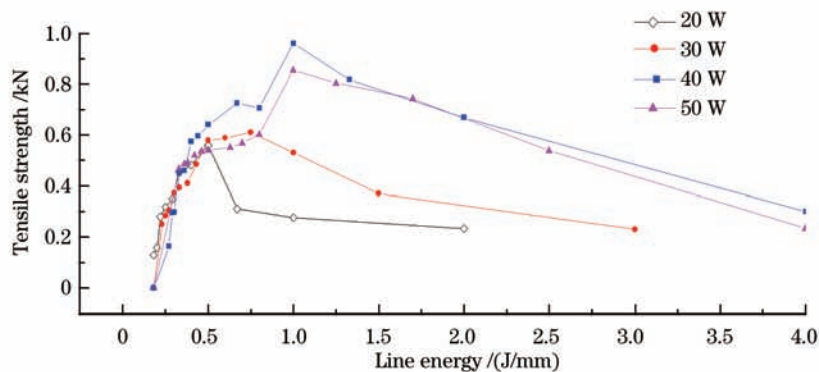


图 13 透明塑料厚度 1 mm 时激光能量输入对焊接强度的影响

Fig.13 Weld strength as a function of line energy with transparent thickness of 1 mm

5 结 论

主要对透射焊接试验进行研究,对焊接试件做了一系列的测试,其中包括透射率测试、拉伸实验和显微镜

测,并通过实验分析了造成焊接质量低的主要原因。从实验结果可以看出,激光透射焊接参数如激光功率、焊接速度、线能量等都能影响热影响区的宽度。增加激光功率、线能量和降低焊接速度能增加焊缝的宽度。这种影响的原因与激光束的非均匀能量分布有关。光的散射造成光束中心的能量密度最高、边缘最低。

当激光能量输入较低时,在焊接过程中激光束没有足够的能量造成焊接。当线能量增加时,吸收塑料件开始熔化而焊接过程开始。能量输入超过一定水平,在透明塑料与吸收塑料的焊接界面可能发生热分解。进一步增加能量输入,不仅引起吸收塑料的表面热分解,而且可能也造成透明塑料的热分解。

激光功率太大会使塑料完全熔化,影响焊接质量;焊接速度过低会导致气孔等现象,这样都会降低焊缝的性能,并且可以得出结论:为提高焊接强度、减少焊缝内部缺陷、获得良好的力学性能,需要相互调整参数得到最佳焊接参数。

参考文献

- 1 Xie Long, Liu Liming. Laser welding technology and properties of material plastics [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(5): 97-100.
谢 龙, 刘黎明. 高分子材料塑料的激光焊接工艺及性能 [J]. 焊接学报, 2007, 28(5): 97-100.
- 2 Zhang Huizhong. Experiment Research and Numerical Simulation on Laser Transmission Welding of Thermoplastic [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007. 59-77.
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]. 镇江: 江苏大学, 2007. 59-77.
- 3 Liu Huixia, Xing An, Zhang Huizhong. 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. 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(15): 1801-1807.
- 4 Li Jiao, Tang Xinhua. Mechanism and Technics Research of PMMA/ABS Thermoplastic Laser Transmission Welding [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. 59-77.
李 姣, 唐新华. PMMA/ABS 热塑性塑料光透射焊接机理和工艺的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008. 59-77.
- 5 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.
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.
- 6 Liu Huixia, Li Pin, Xing An, *et al.*. Laser transmission welding of thermoplastic polyurethane films [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(S1): 156-160.
刘会霞, 李 品, 邢 安, 等. 热塑性聚氨酯弹性体薄膜激光透射焊接工艺 [J]. 中国激光, 2009, 36(S1): 156-160.
- 7 Li Xiaoyu. Study on the Laser Transmission Welding of Transparent Thermoplastic of PMMA [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
李晓宇. 透明 PMMA 板激光透射焊接技术研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- 8 E Rodríguez-Vidalá, I Quintana, C Gadeab. Laser transmission welding of ABS: Effect of CNTs concentration and process parameters on material integrity and weld formation [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 57: 194-201.
- 9 G Zaka, L Mayboudi, M Chena, *et al.*. Weld line transverse energy density distribution measurement in laser transmission welding of thermoplastics [J]. J Materials Processing Technology, 2010, 210(1): 24-31.
- 10 M Chen, G Zak, P J Bates. Effect of carbon black on light transmission in laser welding of thermoplastics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(1): 43-47.
- 11 M Devrient, X Da, T Frick, *et al.*. Experimental and simulative investigation of laser transmission welding under consideration of scattering [J]. Physics Procedia, 2012, 39: 117-127.
- 12 B Acherjee, A S Kuar, S 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.
- 13 I Mingareev, F Weirauch, A Olowinsky, *et al.*. Welding of polymers using a 2 μm thulium fiber laser [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(7): 2095-2099.
- 14 B Acherjee, A S Kuar, S Mitra, *et al.*. Modeling of laser transmission contour welding process using FEA and DoE [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(5): 1281-1289.
- 15 Lei Jianbo, Wang Zhen, Wang Yunshan, *et al.*. Experiment study of laser transmission welding of polymethylmethacrylate [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0103006.

- 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.
- 16 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.
- 17 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.
- 18 Jiao Junke, Jiang Huarui, Zhou Guangbing, *et al.*. Experimental study on laser transmission welding of PMMA [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 051401.
- 焦俊科, 江桦锐, 周广兵, 等. PMMA 激光穿透焊接的实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 051401.