

# 激光透射塑料焊接剪切强度测试方法分析研究

刘臻<sup>1</sup>, 王耀民<sup>2</sup>, 王瑛玮<sup>3</sup>, 程亚婷<sup>3</sup>, 曹延君<sup>3</sup>

(1. 吉林省科学技术信息研究所, 吉林 长春 130021;

2. 吉林省激光工程中心, 吉林 长春 130020; 3. 吉林大学材料科学与工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:**选取透明有机玻璃(PMMA)板条和半透明聚苯乙烯(PS)板条试样搭接后进行了激光焊接,按照目前常用的两种塑料焊接强度测试方法在万能材料试验机上试验观测,对观测结果的测量和分析证明:第一种塑料焊接强度测试方法(两块板条搭接未做贴附补偿)会因为附加力矩的作用改变焊接面受力状态,第二种塑料焊接强度测试方法(两块板条搭接做贴附补偿)仍然会产生附加力矩,贴附补偿不能保证焊接面受力状态回归到纯剪切状态,最后讨论了附加力矩所带来偏转角 $\phi$ 大小的主要影响因素。

**关键词:**激光透射焊接;塑料焊接强度;焊接质量检测

**中图分类号:**TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.03.003

## Study on tensile shear strength testing of plastic plaques jointed by laser transmission welding

LIU Zhen<sup>1</sup>, WANG Yao-min<sup>2</sup>, WANG Ying-wei<sup>3</sup>, CHENG Ya-ting<sup>3</sup>, CAO Yan-jun<sup>3</sup>

(1. Science and Technology Information Institution of Jilin Province, Changchun 130021, China;

2. Laser Engineering Center of Jilin Province, Changchun 130020, China;

3. Department of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

**Abstract:** Polymethyl methacrylate (PMMA) transparent plaque and polystyrene (PS) semitransparent plaque were jointed together by laser welding, and the tensile shear strength of the resultant samples were examined by two widely accepted testing methods, simple-lap method without additional joint and simple-lap method with additional joint. The comparative testing results show that simple-lap joint method without additional joint can not keep the stress at vertical definition to the plaque surface during testing, and the simple-lap method with additional joint also fails in shielding the specimens from tensile stress during testing, due to the existence of additional bending moments. It implies that the additional lap joint at the fixture block is not successful in providing pure shearing stress condition for the plaques. And the main factors of the deflection distortion angle ( $\phi$ ) caused by additional bending moments are also discussed.

**Key words:** laser transmission welding (LTW); strength of plastic welding; tensile shear strength of simple-lap joint

### 1 前言

塑料激光焊接最早可以追溯到20世纪60年代<sup>[1]</sup>,是一种新兴的塑料连接技术。与传统的塑料连接方法如胶接,热熔焊接,摩擦焊接,超声波焊接等连接方法相比,激光透射焊接具有明显优势:非接触式焊接无粉尘等污染物产生,没有对模具的磨损,

焊接区域光学性能良好,加工精度高<sup>[2]</sup>。

近几十年来,由于近红外激光(NIR)特别是半导体激光成本不断降低,使这一研究领域又有了

**作者简介:**刘臻(1975-),女,学士,工程师,主要研究方向为科技信息查新检索。

**收稿日期:**2013-07-08

更大可发展的空间<sup>[3]</sup>。另一方面,塑料是金属和玻璃的良好替代品在工业领域中日趋广泛,现代汽车业、电子产品、包装业、医疗器械等诸多产业中都离不开各种工程塑料<sup>[4]</sup>,而且随着对产品质量轻量化要求的不断增加,工程塑料的种类和适用范围正不断在扩大。这些都使得塑料的连接成为一个不可忽视的问题,因此近年来越来越多的研究人员都对激光透射焊接塑料进行了深入的研究,包括各种实验参数对焊接质量影响的探讨<sup>[5-8]</sup>,焊接强度和焊接质量的数值模拟<sup>[9-10]</sup>等。激光透射塑料焊接技术的原理如图1所示。

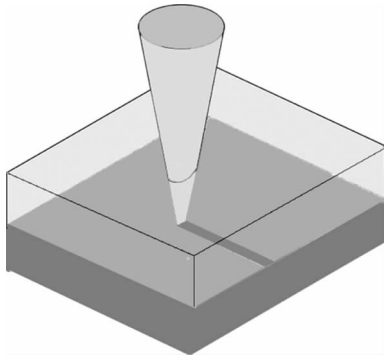


图1 激光透射焊接塑料示意图

Fig. 1 Schematic of laser transmission welding of plastics

上层材料为在相应的波长处能够透过激光的塑料,下层材料为吸收激光的塑料。两层材料叠搭在一起,在夹紧力的作用下激光束以一定的速度扫过重叠部分,此时下层材料表面将吸收的激光转化成热能,使吸收表面塑料熔化进而加热上层材料,冷却后,最终使两层材料结合在一起。

性能试验对于评价加工工艺有重大意义,可以给设计者提供可用数据。为保证激光透射塑料焊接试样的焊接质量,通常要对接头的力学性能指标进行测定试验。这些力学性能指标包括剪切强度、正拉强度、冲击强度、疲劳强度及断裂韧性等。在设计焊接接头时,根据焊接结构的承载状况,人们更为关心的是接头的剪切强度。而如何准确地测定接头的纯剪切强度,目前的研究开展的还比较少。因此,有必要对现有的各种方法进行研究改进以期得到一种可获取激光焊接塑料焊接接头剪切强度的测试评价方法。

## 2 激光透射塑料焊接接头剪切强度测试方法介绍

现行激光透射塑料焊接接头剪切强度测试方法主要有两种,如图2所示。图2(a)两块板条搭接未做贴附补偿<sup>[11-12]</sup>,图2(b)两块板条搭接做贴附补偿,方法是在单搭接焊接试样两端与夹头之间添加

适当填充物<sup>[13-14]</sup>。

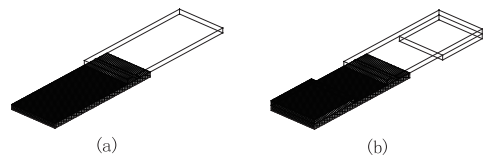


图2 激光透射塑料焊接接头剪切强度测试试样

Fig. 2 Single-lap specimens in laser transmission welding of plastics

测试时在试件的两端施加纵向拉伸力,以一定的速度进行拉伸,测定试件焊接接头破坏时的最大负荷 $P$ ,并通过观察测量获得断口焊接区域有效面积 $S$ ,激光焊接接头剪切强度按下式计算:

$$\tau_c = P/S$$

其中, $\tau_c$ 为剪切强度,MPa; $P$ 为最大拉力值,N; $S$ 为焊接区域有效面积, $\text{mm}^2$ 。

## 3 实验

### 3.1 实验材料

实验选取透明有机玻璃(PMMA)塑料作为上层透过材料,不透明聚苯乙烯(PS)作为下层吸收材料。PMMA试样几何尺寸为 $40\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 1.4\text{ mm}$ ,PS试样几何尺寸为 $40\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 4.0\text{ mm}$ ;吸收剂选择普通水性白板笔墨迹(炭黑)。图3为实验材料实物照片。

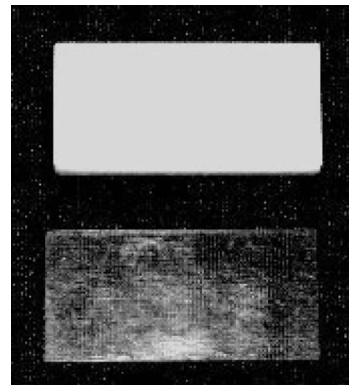


图3 实验材料

Fig. 3 Material of the experiment

### 3.2 实验设备

S-30-808-4型半导体激光光纤耦合输出激光器系统,最大输出功率30 W,波长808 nm;CSS-1102C型全电子万能试验机;Canon EOS 550D型数码相机。

### 3.3 实验方法

实验采用单搭接的方式,在剪切拉伸过程中分别采用了图2当中的两种检测方法。对两组试样的焊接接头剪切强度进行了测试。测试在CSS-1102C型全电子万能试验机上进行,加载速度为 $10\text{ mm/min}$ ,试验过程中采用连拍的方法来记录试

样从未受力状态直至断裂的过程。

## 4 结果与讨论

### 4.1 实验结果

图4和图5分别与图2(a)、2(b)的剪切测试方法对应两种检测方法在拉伸过程中试样变化。其中:(a)为试样未被拉伸前;(b)为拉伸过程中。

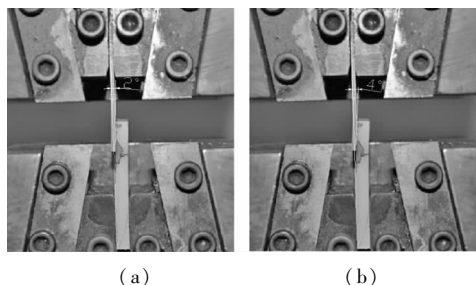


图4 未做贴附补偿试样的拉伸过程

Fig. 4 Photographic view of single-lapped specimen without additional part in shear pulling test

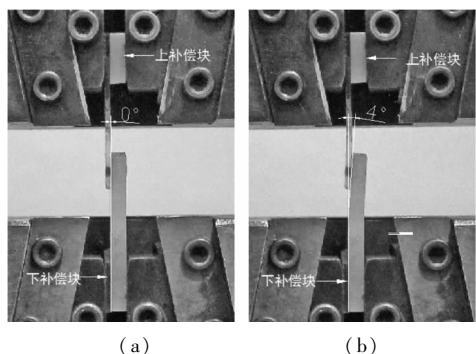


图5 有贴附补偿试样的拉伸过程

Fig. 5 Photographic view of single-lapped specimen with additional part in shear pulling test

### 4.2 实验结果测量分析

实验观测:激光塑料焊接抗剪切强度试验第一种焊接接头剪切检测方法(如图4所示)在拉伸未开始和试样断裂前发生了 $2^\circ$ 的角度偏转,第二种焊接接头剪切检测方法(如图5所示)在拉伸未开始和试样断裂前发生了 $4^\circ$ 的角度偏转。造成偏转的原因就是由于试样所受到的外力不同轴,在拉力 $F$ 作用下,附加力矩会使焊接接头的焊缝处发生一定角度的偏转。最终材料在弯矩作用下断裂。因而剪切试样的破坏实际上是由剪切应力和剥离应力的综合作用所造成的。

### 4.3 两种实验的试样受力分析

#### 4.3.1 未做贴附补偿情况下剪切试验过程受力分析

目前广泛应用的激光塑料焊接抗剪切强度试验的试样初始受力情况如图6(a)所示。由于焊接在一起的两片试样两端所受到的外力不同中心,在拉力 $F$ 作用下焊接面处会产生一个附加力矩 $M$ ,附加力矩 $M$ 会使

焊缝处发生一定角度 $\phi$ 的偏转,如图6(b)所示,从而使拉力 $F$ 分解为平行于焊接面的剪切力和垂直于剪切面的剥离力,因而剪切试样的破坏是由剪切力和剥离力的综合作用所造成,试验得到的破坏力为焊接面真实抗剪切力与剥离力的合力,而非焊接面的真实抗剪切力。另一方面,焊接结合面两侧的材料在附加力矩 $M$ 的作用下弯曲,导致整个焊缝断裂不同步,测试值与真实值之间将会出现一定误差。

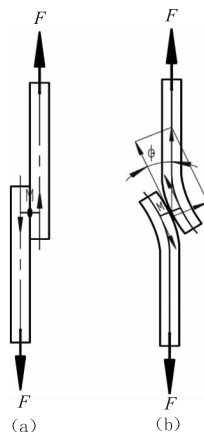


图6 激光塑料焊接试样(未做贴附补偿)剪切试验过程受力情况

Fig. 6 Mechanical condition of single-lapped specimen with additional part in shear pulling test

#### 4.3.2 做贴附补偿情况下剪切试验过程受力分析

另一种常见的激光塑料焊接抗剪切强度测试方法是对两块搭接板条做贴附补偿,即在试样两端与夹头之间添加适当填充物,如图7(a)所示,其目的是通过贴服补偿使上、下两块板条重新回到同一中心线上,但整个试验过程中任一侧贴附块、试样和夹头之间位置无变化,按着作用力与反作用力大小相等、方向相反的原则,作用于板条试样上的力 $F$ 与未做贴附补偿试样的情况并无区别,即仍会出现附加力矩 $M$ 的影响,如图7(b)所示。

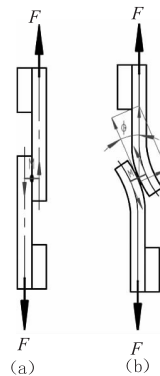


图7 做贴附补偿试样剪切过程受力情况

Fig. 7 Mechanical condition of single-lapped specimen with additional part in shear pulling test

#### 4.4 万能材料试验机夹头设计因素对实验结果的影响分析

万能材料试验机上夹头利用自动调心机构(万向节)悬挂于横梁上,实验过程中夹头是可以前后和左右两个方向上自由活动的(如图8所示),目的是拉伸试验过程中上夹头会自动调整位置,避免实验过程对拉伸试样带来附加弯矩,但是,这样的设计在进行激光塑料焊接抗剪切强度试验过程中,反而加剧了附加力矩 $M$ 的影响,带来更大的偏转角度 $\phi$ ,并导致贴附补偿完全无法起到预期的作用。



图8 万能材料试验机夹头可自由摆动以调整试样中心

Fig. 8 Universal testing machine chuck

#### 4.5 激光塑料焊接剪切强度试验焊缝偏转角度 $\phi$ 的影响因素初步分析

(1)焊缝宽度的影响。焊缝宽度越小,偏转角度 $\phi$ 越大,反之越小。

(2)材料弹性模量 $E$ 的影响。其他条件不变的情况下,材料的弹性模量 $E$ 越小则 $\phi$ 越大。

(3)试样几何尺寸的影响。

①试样厚度的影响。两块条状试件的厚度越大,两者间的中心距越大,力矩 $M$ 越大,偏转角度 $\phi$ 将越大,但增大厚度的另外一个作用是:一定力矩 $M$ 作用下偏转角度 $\phi$ 将减小,因此,两块条状试件的厚度越大对偏转角度 $\phi$ 的影响较为复杂,试样所用材料刚度 $E$ 的影响也必将掺杂其中。

②试样长度的影响。试样长度越大,装夹处与焊缝的距离将越大,此时力矩 $M$ 不变,但偏转角度 $\phi$ 将会加大。

### 5 结论

(1)激光塑料透射焊接技术中,焊缝的抗剪切强度是最重要的焊接强度测试方法,由于焊接在一

起的两片试样两端所受到的外力不同中心,在拉力 $F$ 作用下焊接面处会产生一个附加力矩 $M$ ,附加力矩 $M$ 会使焊缝处发生一定角度 $\phi$ 的偏转,从而使拉力 $F$ 分解为平行于焊接面的剪切力和垂直于剪切面的剥离力,试验得到的破坏力并非焊接面的真实抗剪切力。

(2)另一种激光塑料焊接抗剪切强度测试方法经常被采用,改进之处是对试样装夹处做贴附补偿,其目的是使上、下两块板条实验中所受力重新回到同一中心线上,但仍无法避免附加力矩 $M$ 的影响,实验过程中仍将发生一定角度 $\phi$ 的偏转。

(3)万能材料试验机上夹头自动调心机构(万向节)的作用是拉伸试验过程中上夹头会自动调整位置,避免实验过程对拉伸试样带来附加弯矩。但是,这样的设计在进行激光塑料焊接抗剪切强度试验过程中,反而加剧了附加力矩 $M$ 的影响,带来更大的偏转角度 $\phi$ ,并导致贴服补偿无法起到预期的作用。

(4)影响偏转角度 $\phi$ 大小的因素很多,经初步分析认为主要包括:焊缝宽度越小,偏转角度 $\phi$ 越大;其他条件不变的情况下,材料的弹性模量 $E$ 越小则 $\phi$ 越大;两块条状试件的厚度影响较为复杂,难以准确分析;试样长度越大,但偏转角度 $\phi$ 将会加大。

### 参考文献:

- [1] Jr Silvers H J, Wachtell S. Welding and cutting plastic films with a continuous CO<sub>2</sub> laser[J]. Eng. Proc, 1970: 88-97.
- [2] Laser-Welding of Plastics, [http://www.dukane.com/us/pla\\_laser.htm](http://www.dukane.com/us/pla_laser.htm).
- [3] Marcus Warwick, Marcus Gordon. Application studies using through-transmission laser welding of polymers[J]. Joining Plastics (2006) London; National Physical Laboratory (NPL), 2006, 08: 25-26.
- [4] Bappa Acherjee, Dipten Misra, Dipankar Bose, et al. Prediction of weld strength and seam width for laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology [J]. Optical & Technology, 2009, (41): 956-967.
- [5] Lliea M, Cicala E, Grevey D, et al. Diode laser welding of ABS; Experiments and process modeling[J]. Optics & Laser Technology, 2009, (41): 608-614.
- [6] Acherjee B, Kuar A S, Mitra S, et al. Selection of process parameters for optimizing the weld strength in laser transmission welding of acrylics [J]. Proc. IMechE, 224 Part

- B:J. Engineering Manufacture;1529 – 1536.
- [7] Elhem Ghorbel, Giuseppe Casalino, Stéphane Abed. Laser diode transmission welding of polypropylene: geometrical and microstructure characterisation of weld [J]. Materials and Design, 2009, (30): 2745 – 2751.
- [8] Mingliang Chena, Gene Zaka, Philip J Bates. Effect of carbon black on light transmission in laser welding of thermoplastics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, (211): 43 – 47.
- [9] James D Van de Ven, Arthur G Erdman. Laser transmission welding of thermoplastics-part I: temperature and pressure modeling [J]. Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129: 849 – 858.
- [10] Mariana Ilie, Jean-Christophe Kneip, Simone Matte, et al. Through-transmission laser welding of polymers-temperature field modeling and infrared investigation [J]. Infrared Physics & Technology, 2007, (51): 73 – 79.
- [11] Xie Long, Liu Liming. Plastic laser welding process and performance of polymer materials [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28 (5): 97 – 100. (in Chinese)
- 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.
- [12] Xiao Wang, Cheng Zhang, Pin Li, et al. Modeling and optimization of joint quality for laser transmission joint of thermoplastic using an artificial neural network and a genetic algorithm [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012 (50): 1522 – 1532.
- [13] Gong Fei. Research on thermoplastic PP laser transmission welding technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- 龚飞. 热塑性塑料 PP 激光透射焊接技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [14] Li Jiao. Mechanism and technics research of PMMA/ABS thermoplastic laser transmission welding [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- 李姣. PMMA-ABS 热塑性塑料激光透射焊接机理和工艺的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.