

# 工艺参数对激光透射焊接 PA66 的间隙、熔深和剪切强度的影响

严长 李品 刘会霞 蔡野 陈浩 黄创 赵振关 王霄

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 基于玻纤和碳纤增强的 PA66 热塑性材料,研究了夹紧力对焊接件的间隙、熔深和剪切强度的影响,分析了三者之间的联系,得出夹紧力在焊接试验中的重要性。进一步研究了焊接速度和功率对熔深和剪切强度的影响,从大量的试验数据和拟合曲线中得出熔深与剪切强度之间的关系。最后,讨论了线能量对熔深和剪切强度的影响。结果表明,工艺参数影响焊接件的间隙和熔深,从而使得剪切强度发生改变,研究焊接件的间隙和熔深的变化能很好地认识到工艺参数是如何影响剪切强度的。

**关键词** 激光技术;激光透射焊接;PA66;间隙;熔深;剪切强度

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.121402

## Influence of Process Parameters on Weldment Gap, Depth of Fusion and Lap-Shear Strength of PA66 with Laser Transmission Welding

Yan Zhang Li Pin Liu Huixia Cai Ye Chen Hao Huang Chuang  
Zhao Zhenguan Wang Xiao

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** The influence of clamp pressure on the gap, the depth of fusion and the lap-shear strength of weldments is studied based on PA66 thermoplastic materials reinforced with glass fiber and carbon fiber. The relation among the gap, the depth of fusion and the lap-shear strength is analyzed, from which the great importance of clamp pressure in the welding test can be seen. The effect of welding velocity and power on the depth of fusion and the lap-shear strength is then studied deeply. The connection between the depth of fusion and the lap-shear strength of weldments is obtained from a large number of experimental data and fitting curves. Finally, the influence of linear energy on the depth of fusion and the lap-shear strength of weldments is discussed. The results show that the process parameters affect the weldments gap and the depth of fusion, which results in the changes of the lap-shear strength. The study of the changes of the weldments gap and the depth of fusion can make it clear that how does the process parameters affect the lap-shear strength.

**Key words** laser technique; laser transmission welding; PA66; gap; depth of fusion; lap-shear strength

**OCIS codes** 140.3070; 140.3390; 160.5470; 140.3460

## 1 引言

激光透射焊接热塑性塑料材料较传统的塑料焊接方法有着许多优点<sup>[1-2]</sup>,例如形成精密、密封的焊缝,光污染少,焊接热应力和振动应力小,焊接接头不可见,焊接速度快、质量高,易于控制和实现自动化等。因此,激光透射焊接技术有着相当广阔的应用前景。

**收稿日期**: 2013-08-09; **收到修改稿日期**: 2013-08-12; **网络出版日期**: 2013-11-19

**基金项目**: 国家自然科学基金(51275219)、江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201105)

**作者简介**: 严长(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光加工和数字化设计与制造方面的研究。

E-mail: jsdxyanzhang@126.com

**导师简介**: 刘会霞(1964—),女,博士,教授,主要从事激光加工和数字化设计与制造方面的研究。

E-mail: lhx@ujs.edu.cn (通信联系人)

目前,国内外对激光透射焊接的研究很多,而国外对激光透射焊接的研究开展得较早,也较为深入和广泛。Potente 等<sup>[3-5]</sup>进行了激光透射焊接的工艺研究;Becker 等<sup>[6-8]</sup>对激光透射连接热塑性材料的温度场、应力场进行了数值模拟的研究。2009~2011年,Acherjee 等<sup>[9-11]</sup>采用各种优化方法对激光透射焊接热塑性聚合物的工艺参数(激光功率、扫描速度、离焦量和夹紧力)进行了优化,分析了工艺参数对焊接质量的影响。Haberstroh 等<sup>[12]</sup>观察到用高斯分布的半导体激光束焊接的焊缝横断面[聚丙烯(PP)和聚缩醛(POM)材料——半结晶材料]的透镜状熔化区域,得出小的能量输入导致熔化区域变小,使得搭接面的边沿形成不完整的连接,从而使得焊接强度变低。2009年,Ghorbel 等<sup>[13]</sup>对半导体激光透射焊接的焊缝形貌和微观结构进行了分析,描述了激光加工参数对焊接熔化区域的影响,得出提高激光能量和降低焊接速度都会使得焊接熔化区域变大,并对熔池的宽度和深度进行了评价。Abed 等<sup>[14]</sup>研究了激光透射焊接聚碳酸酯(PC)材料,研究了炭黑含量和上下层材料熔深比的关系,对吸收层的熔深也做了相关的研究。可以看出,国外对于激光透射焊接的研究大部分集中在工艺研究、参数优化和数值模拟上,主要研究了工艺参数对焊缝宽度和强度的影响,在对断面形貌的研究上,则主要集中在熔化区域的形状和对微观结构的分析上,部分研究涉及了熔深、上下层熔深比的观测。实验研究发现,工艺参数对焊接件的间隙有很大的影响,其中夹紧力的影响更为显著,但关于夹紧力对焊接件的间隙和熔深的影响以及焊接速度和功率对熔深和剪切强度的影响却很少有人研究。本文基于玻纤、碳纤增强的 PA66 材料,以实验加分析的方法研究了其在搭接焊试验中夹紧力对焊接件间隙、熔深和剪切强度的影响,分析焊接件间隙、熔深和剪切强度之间的关系。研究了功率、速度和线能量等工艺参数对焊缝断面形貌、熔深和剪切强度的影响,并进一步分析了熔深和剪切强度之间的内在联系。

## 2 试验设备及材料

### 2.1 激光器及夹紧装置的选择

试验采用 DILAS 公司 Compact130/140 型半导体连续激光器,最大输出功率 130 W,波长为 $(980 \pm 10)$  nm,激光器采用光纤传输,最小光斑直径 700~800  $\mu\text{m}$ ,如图 1 所示。夹具采用平板螺纹夹紧机构,夹紧力数值由压力传感器测出并显示在数显表上,如图 2 所示。



图 1 半导体激光器

Fig.1 Semiconductor laser

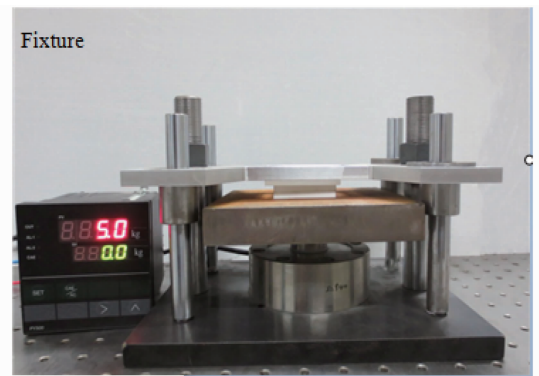


图 2 夹具

Fig.2 Fixture device

### 2.2 试验材料

试验采用搭接焊方式,上层为 30%玻纤(GF)增强的 PA66 材料(乳白色),作为激光透射层;下层为 30%碳纤(CF)增强的 PA66 材料(黑色),作为激光吸收层。上下两层材料剪成 20 mm $\times$ 40 mm $\times$ 2 mm 和 20 mm $\times$ 20 mm $\times$ 2 mm 两种规格数片,剪裁后的试样去毛刺,并用酒精擦洗去除污垢。前一种规格用于拉伸试验,后一种规格用于切割断面来观测熔深,搭接面尺寸均为 20 mm $\times$ 20 mm。

### 2.3 测试方法

评价 PA66 焊接质量的方法有多种,包括外观形貌、断面形貌、焊缝宽度、剪切拉力、剪切强度和剥离强度等,而其中剪切强度又可用 MPa 和 N/mm 作为单位来评价<sup>[15]</sup>,本文采用后者来评价剪切强度并观测断面形貌来评价 PA66 的焊接质量。在固定离焦量和光斑直径的情况下,焊缝宽度变化很小,所以研究焊缝断面

熔化区域面积可以定量地转变为研究熔池的深度即熔深。通过三思纵横的电子万能试验机做拉伸试验,如图3所示,测量焊接件的剪切强度;采用基恩士的数码显微系统 VHX-1000C 做形貌观察,如图4所示,测量焊后间隙和焊接件上、下层熔深。

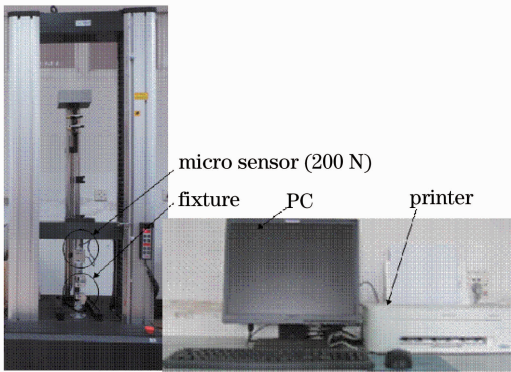


图3 电子万能试验机

Fig. 3 Electronic universal testing machine

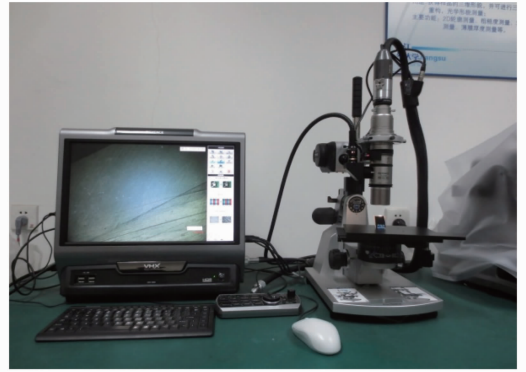


图4 数码显微系统 VHX-1000C

Fig. 4 Digital microscope system VHX-1000C

### 3 试验结果与分析

试验中尝试了-2、-1、0、+1和+2 mm 五种离焦量下,焊缝形貌和剪切强度的变化关系,发现离焦量的变化对焊缝的外观形貌和剪切强度的影响都很小。本试验采用-1 mm 的离焦量,在该离焦量下,焊缝外观较均匀、美观,光斑直径约为  $800\ \mu\text{m}$ ,焊缝宽度约为  $1000\ \mu\text{m}$ 。

#### 3.1 夹紧力对工件间隙、熔深和剪切强度的影响

试验研究发现,夹紧力变化会对焊接后试样的间隙有影响,并导致上下层熔深和剪切强度的变化。本试验采用了五种夹紧力来观测焊接件间的间隙:1.2, 2.5, 3.9, 5.2 和 6.8 kg,考虑到工件搭接面积的影响,转化为单位面积上所受的力:0.03, 0.0625, 0.0975, 0.13 和 0.17 MPa,此后仍称为夹紧力。由于间隙沿着焊接件宽度方向是变化的,为了评价的统一性,本试验测量焊缝边沿外 1 mm 处的间隙,得到夹紧力与间隙

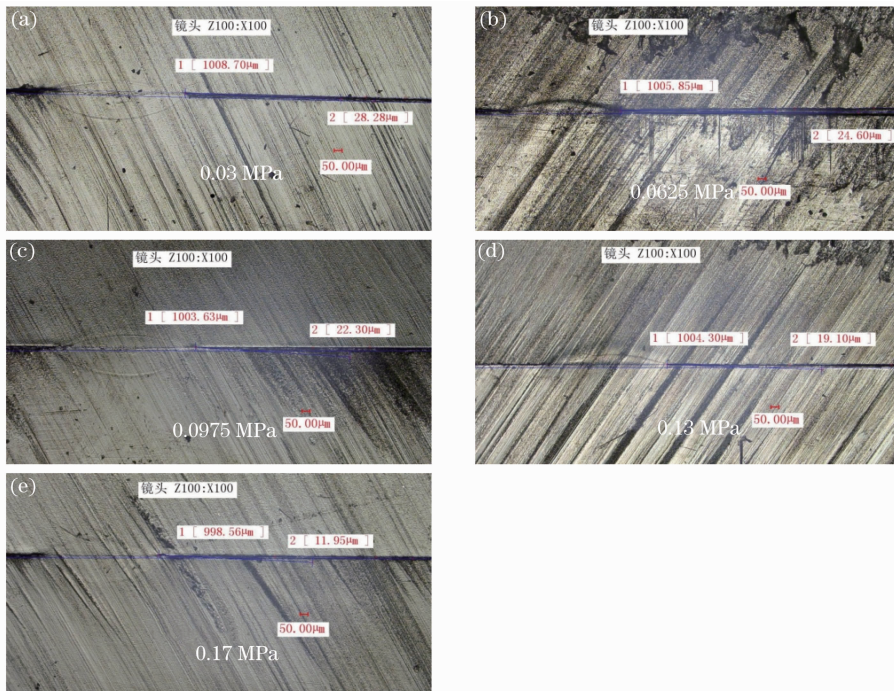


图5 不同夹紧力下工件的断面形貌和间隙

Fig. 5 Cross-sectional morphology and gap of workpieces under various pressures

的微观形貌图如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,在功率  $P=3\text{ W}$ ,焊接速度  $V=6\text{ mm/s}$ ,离焦量  $-1\text{ mm}$  的情况下,夹紧力从  $0.03\text{ MPa}$  增加到  $0.17\text{ MPa}$ ,熔池形貌呈现椭圆形,焊接件的间隙由  $30\text{ }\mu\text{m}$  下降至  $12\text{ }\mu\text{m}$  左右,可见,焊接件的间隙受夹紧力的影响较大。

图 6 为夹紧力与焊接件的间隙的关系图,图中拟合的曲线只代表变化趋势,并不说明实际变化规律(下同)。随着夹紧力的增大,间隙减小,即夹紧力从  $0.03\text{ MPa}$  增加至  $0.17\text{ MPa}$ ,焊接件的间隙从最大约  $30\text{ }\mu\text{m}$  降至  $12\text{ }\mu\text{m}$ ,下降趋势和幅度都相当的明显。

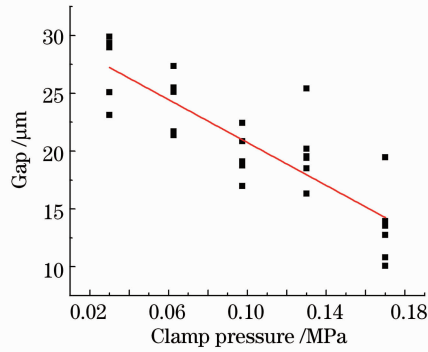


图 6 间隙与夹紧力的关系

Fig. 6 Relation between gap and clamp pressure

图 7 为夹紧力对上下层熔深的影响,由图中可以看出,随着夹紧力的增加,上层熔深从约  $80\text{ }\mu\text{m}$  变化至  $90\text{ }\mu\text{m}$ ,下层熔深从约  $180\text{ }\mu\text{m}$  变化到  $200\text{ }\mu\text{m}$ ,上下层熔深变化都很小,略微有所增加,且增加的趋势并不明显。图 8 为夹紧力对剪切强度的影响,可以看出当夹紧力从  $0.03\text{ MPa}$  增加到  $0.17\text{ MPa}$  时,剪切强度从  $10\text{ N/mm}$  增加到约  $20\text{ N/mm}$ ,但剪切强度增幅变小,即图中曲线的斜率变小。夹紧力的增加可显著提高剪切强度,但上、下层熔深增加很小。这可能是因为试验中焊接件的间隙只在十几微米间变化,并非宏观上的间隙,故使得熔深(含热影响区)增加很小,但间隙的减小能促进分子扩散,使上、下层材料交融得更多,从而有效提高强度。当间隙小到一定程度时,剪切强度基本不再增加,这是因为温度占主导因素,虽然小的间隙能促进分子扩散,但因温度下降,分子热运动变慢,分子间的扩散受到限制,使得强度只有略微的增加。

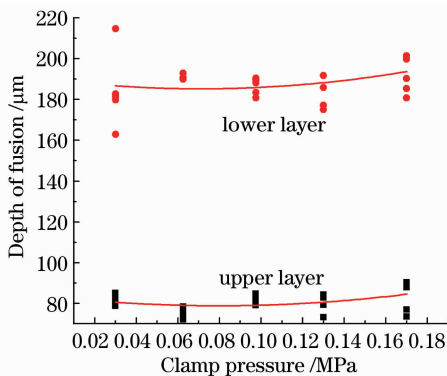


图 7 夹紧力对熔深的影响

Fig. 7 Effect of clamp pressure on depth of fusion

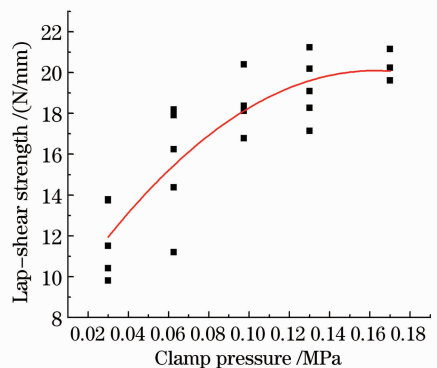


图 8 夹紧力对剪切强度的影响

Fig. 8 Effect of clamp pressure on lap-shear strength

### 3.2 焊接速度、功率对熔深和剪切强度的影响

试验研究发现,在夹紧力不变的情况下,随着焊接速度和焊接功率的改变,焊接件间隙的变化很小,这可能是因为激光透射焊接中激光对工件不存在力的作用。

焊接速度  $V$  是影响焊接质量的重要因素之一,选择夹紧力  $38.2\text{ N}$ ,离焦量  $-1\text{ mm}$ ,焊接功率为  $3\text{ W}$ ,得到速度变化的情况下的熔深形貌图,如图 9 所示。

从图 9 可以看出,熔池形貌在宽度上(焊缝宽)基本不变,熔池的深度值却随着焊接速度的变化发生很大

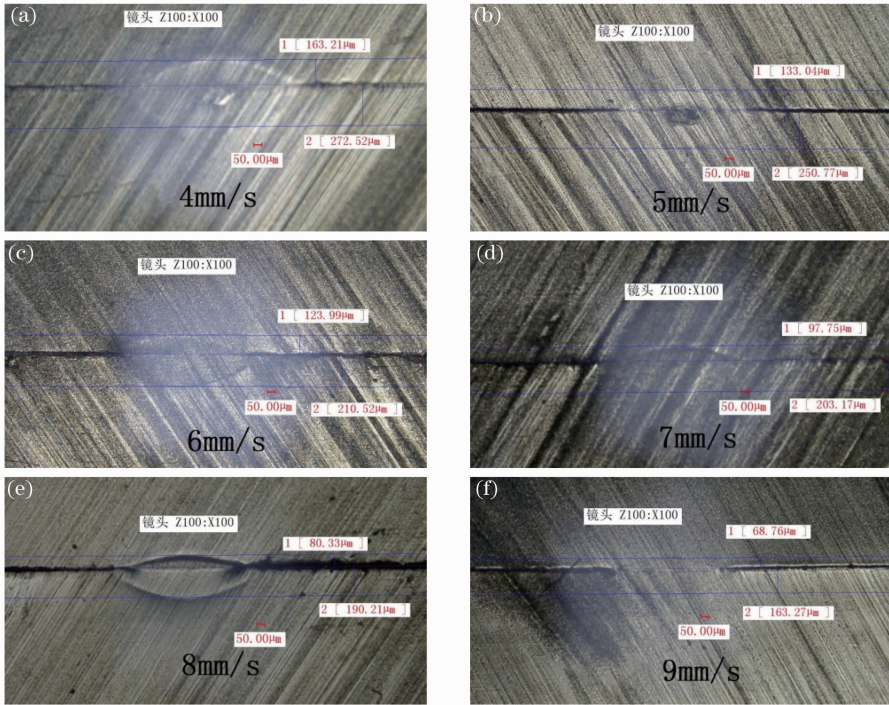


图 9 不同焊接速度下的断面形貌图

Fig. 9 Cross-sectional morphology under various velocities

的变化。当速度从 4 mm/s 增加到 9 mm/s 时,上层的熔深从 163 μm 降至 68 μm,下层的熔深从 272 μm 降至 163 μm,总体上,上、下层的熔深都在减小。当速度  $V=4$  mm/s 和 5 mm/s 时,有烧蚀孔洞出现,且速度越小烧蚀孔洞的越大,随着速度增加,孔洞消失。

从图 10、11 中可以看出,随着焊接速度的增加,上层材料的熔深由约 160 μm 降至 65 μm,而下层熔深由约 270 μm 降至 165 μm,两条曲线近似平行;焊接速度从 4 mm/s 增加到 6 mm/s,剪切强度从 16 N/mm 增加到 19 N/mm,当速度继续增加到 9 mm/s 时,剪切强度下降到 13 N/mm。当速度在 6 mm/s 时,剪切强度达到最大。从上述试验现象可以得出,速度在 4 mm/s 和 5 mm/s 时,材料有烧蚀现象,出现孔洞,熔深虽然很大但材料烧蚀严重降低了剪切强度;当速度继续增大时,上、下层的熔深变小,材料间的分子扩散相应减少,强度也随之降低。

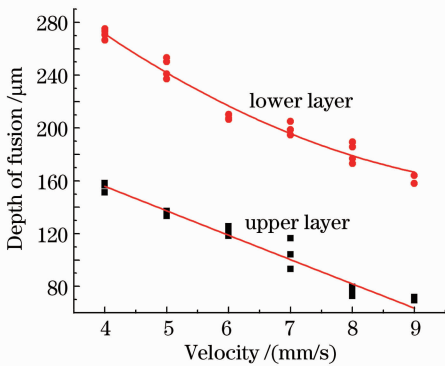


图 10 速度对熔深的影响

Fig. 10 Effect of velocity on depth of fusion

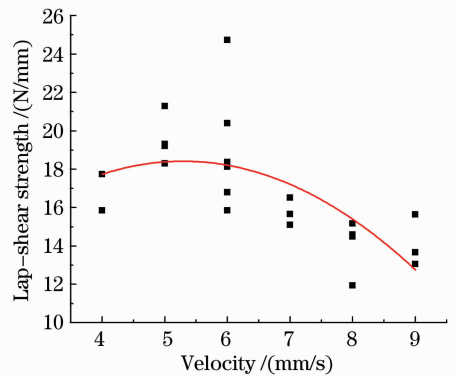


图 11 速度对剪切强度的影响

Fig. 11 Effect of velocity on lap-shear strenght

焊接功率  $P$  同样对焊接质量有着很大的影响。选择夹紧力为 38.2 N,离焦量 -1 mm,焊接速度为 6 mm/s,得到在功率变化情况下的断面形貌图,如图 12 所示。

从图 12 中可以看出,当功率从 1.5 W 增加到 6 W 时,上层熔深从 41 μm 增加到 183 μm,下层熔深从 132 μm 增加到 316 μm,可见随着功率的增加,上、下层材料的熔深都在增加,当功率达到 4 W 时有微小的孔

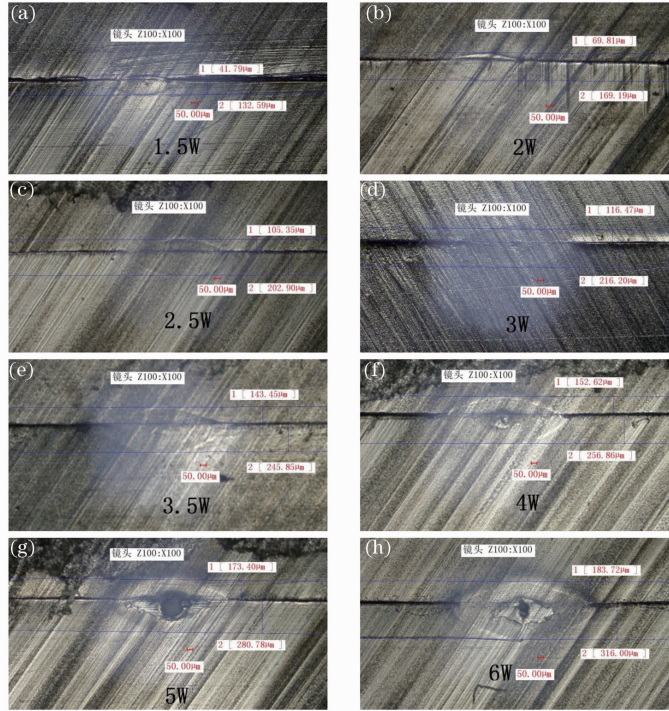


图 12 不同功率下的断面形貌图

Fig. 12 Cross-sectional morphology under various powers

洞产生,当功率达到 5 W 和 6 W 时,出现烧蚀现象,烧蚀孔洞很大。

图 13 表明功率对上、下层熔深的影响,由图中可以看出,当功率从 1.5 W 增加到 6 W 时,上层熔深由 40  $\mu\text{m}$  增加到 170  $\mu\text{m}$ ,下层熔深由 130  $\mu\text{m}$  增加到 320  $\mu\text{m}$ 。上、下层的熔深都明显增加,但增加的幅度变得缓和,图中表现为两条曲线的斜率减小,尤其是上层的熔深更加趋于平缓。图 14 表明功率的变化对剪切强度的影响,可以看出,当功率从 1.5 W 增加到 3.5 W 时,剪切强度从 10 N/mm 增加到 18 N/mm,功率在 3~3.5 W 时,剪切强度达到最大,当功率继续增加到 6 W 时,剪切强度下降至 16 N/mm,剪切强度增加的速度较快而下降缓慢,即图 13 中拟合曲线上升段比下降段陡峭。从两幅图中可以看出,在功率较低时(1.5~3.5 W),随着功率的增加,下层材料吸收的能量增多,上层材料在热传导的作用下得到的能量也增多,上、下层的熔深增加,分子扩散充分,剪切强度得到增加;当功率较大时,出现烧蚀孔洞,孔洞阻碍热量的向上传导和下层材料对后续热量的吸收,影响热量的传递与传导,使得上、下层的熔深增加幅度变小,尤其是上层材料,烧蚀孔洞导致剪切强度下降,但功率增加使得上、下层的熔深增加,补偿了孔洞对剪切强度的削弱,使得功率在 3.5~6 W 时,剪切强度下降趋于缓和,如图 14 所示。

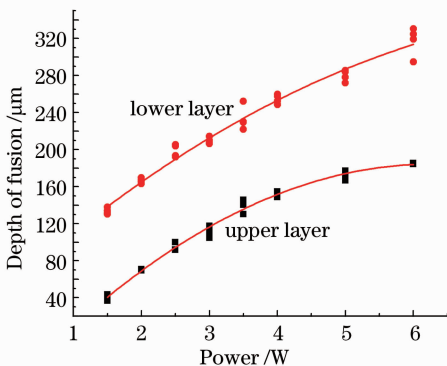


图 13 功率对熔深的影响

Fig. 13 Effect of power on depth of fusion

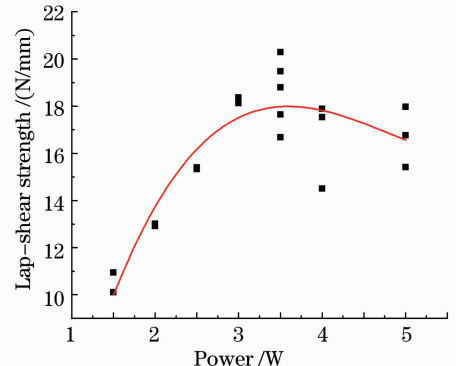


图 14 功率对剪切强度的影响

Fig. 14 Effect of power on lap-shear strength

### 3.3 线能量对熔深和剪切强度的影响

影响激光透射焊接的主要工艺参数包括功率、速度、夹紧力和光斑直径等,其中功率  $P$  和速度  $V$  又是最主要的因素,它们的影响可归结为线能量的影响。定义线能量  $l = \frac{P}{V}$ ,随着线能量的变化,焊接件的熔深和剪切强度的变化关系如图 15、16 所示。

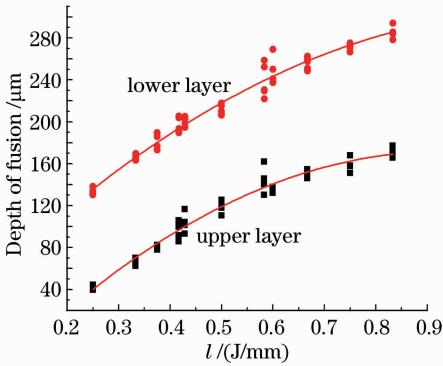


图 15 线能量对熔深的影响

Fig. 15 Effect of linear energy on depth of fusion

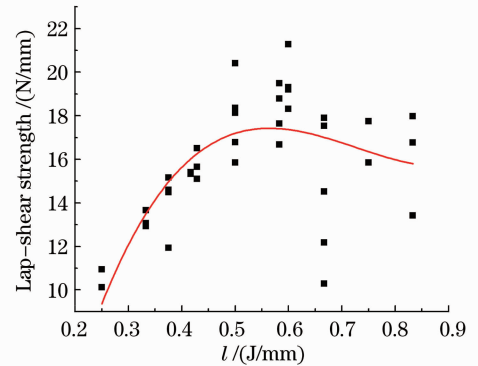


图 16 线能量对剪切强度的影响

Fig. 16 Effect of linear energy on lap-shear strength

从图 15 可以看出当线能量从 0.25 J/mm 增加到 0.83 J/mm 时,上层的熔深从 40  $\mu\text{m}$  增加到 160  $\mu\text{m}$ ,下层熔深从 130  $\mu\text{m}$  增加到 320  $\mu\text{m}$ ,增长的幅度趋于缓和,尤其是上层的材料。从图 16 中可以看出当线能量从 0.25 J/mm 增加到 0.6 J/mm 时,剪切强度从 10 N/mm 增加到 18 N/mm,当线能量继续增加到 0.83 J/mm 时,剪切强度下降到 16 J/mm,剪切强度增长的速度较快而下降较慢。当线能量达到 0.6 J/mm 时,剪切强度最大。这是因为在线能量输入较低时,随着线能量的增加,热扩散充分,使得熔深增加,剪切强度增加;当线能量过高时,出现烧蚀现象,并有孔洞产生,不利于热传导,导致剪切强度下降,熔深增长幅度也变得缓慢,但是线能量的增加导致上下层熔深增加,从而部分抵消烧蚀孔洞对强度的削弱,使得剪切强度下降的幅度较小。从速度、功率和线能量的变化对熔深和剪切强度的影响关系中可以看出,在未出现材料烧蚀现象时,熔深增加能有效地提高剪切强度。因此,线能量能有效地综合考虑焊接功率、焊接速度对焊接质量的影响,结合图 10、11、13 和 14,无论是变化功率还是变化速度,当线能量值相等时,焊接件的上下层熔深和剪切强度基本不变,这也进一步说明了研究线能量的影响是有意义的。

## 4 结 论

基于玻纤、碳纤增强的 PA66 材料,研究其在搭接焊试验中,工艺参数对焊接件的间隙、焊缝熔深和剪切强度的影响,分析试验结果和拟合曲线得出以下的结论:

1) 夹紧力影响焊接质量,在一定范围内,增加夹紧力能减小焊接件间隙和提高剪切强度,而增加夹紧力时,上下层熔深只是略微增加。当夹紧力增大到一定值后,剪切强度不再明显提高。所以,从经济效益角度考虑,选择一个适当的夹紧力不仅能有效地提高强度而且能降低试验成本。

2) 焊接速度  $V$  和焊接功率  $P$  对熔深和剪切强度的影响都很大。随着焊接速度的增大,上、下层熔深减小,剪切强度先增加后降低;随着功率的增加,上、下层的熔深增加,剪切强度先增加后降低,且增加的幅度大于降低的幅度。它们的影响可以归结为线能量的影响,随着线能量的增加,上、下层熔深增加,增幅越来越小;剪切强度先增加后降低,增加的幅度大于降低的幅度,理论上存在一个最佳线能量输入值,使得剪切强度最大。对于本文中所使用的 PA66 材料,此最佳值约为 0.6 J/mm。

3) 熔深与剪切强度之间有着密切的关系,当材料未出现烧蚀现象时,熔深的增加能有效地提高剪切强度。但当有烧蚀孔洞出现时,孔洞会大大削弱剪切强度。熔深在一定层面上反映出剪切强度变化的原因。

## 参 考 文 献

- 1 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.
- 2 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.
- 3 H Potente, F Becker, G Fiegler, *et al.*. Investigations towards application of a new technique on laser transmission welding [J]. Welding in the World, 2001, 45(5-6): 15–20.
- 4 W A Beck, M Huang, J Ketterl, *et al.*. IR laser welding of thin polymer films as a fabrication method for polymer MEMS [C]. Saratov Fall Meeting 2002 Laser Physics and Photonics, Spectroscopy, and Molecular Modeling III, Coherent Optics of Ordered and Random Media III, 2003. 167–178.
- 5 E Haberstroh, W Hoffmann. Laser welding of plastics: a technological overview [J]. Welding and Cutting, 2006, 6(5): 349–354.
- 6 F Becker, H Potente. A step towards understanding the heating phase of laser transmission welding in polymers [J]. Polymer Engineering & Science, 2002, 42(2): 365–374.
- 7 L S Mayboudi, A M Birk, G Zak, *et al.*. A two-dimensional thermal finite element model of laser transmission welding for T joint [J]. J Laser Applications, 2006, 18(3): 192–199.
- 8 B Acherjee, A S Kuar, S Mitra, *et al.*. Modeling and analysis of simultaneous laser transmission welding of polycarbonates using an FEM and RSM combined approach [J]. Opt Laser Technol, 2012, 44(4): 995–1006.
- 9 B Acherjee, D Misra, D Bose, *et al.*. 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 B Acherjee, S Mondal, B Tudu, *et al.*. Application of artificial neural network for predicting weld quality in laser transmission welding of thermoplastics [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(2): 2548–2555.
- 11 B Acherjee, D Misra, D Bose, *et al.*. Optimal process design for laser transmission welding of acrylics using desirability function analysis and overlay contour plots [J]. Int J Manuf Res, 2011, 6(1): 49–61.
- 12 E Haberstroh, R Lützel. Influence of carbon black pigmentation on the laser beam welding of plastics micro parts [J]. J Polymer Eng, 2001, 21(2-3): 119–130.
- 13 Elhem Ghorbel, Giuseppe Casalino, Stéphane Abed. Laser diode transmission welding of polypropylene: geometrical and microstructure characterisation of weld [J]. Materials and Design, 2009, 30(7): 2745–2751.
- 14 S Abed, P Laurens, C Carrétéro, *et al.*. Diode laser welding of polypropylene: investigations of the microstructures in the welded seam [C]. SPIE, 2003, 4831: 77–81.
- 15 Bappa Acherjee, Arunanshu S Kuar, Souren Mitra, *et al.*. Experimental investigation on laser transmission welding of PMMA to ABS via response surface modeling [J]. Opt Laser Technol, 2012, 44(5): 1372–1383.