

# 激光透射焊接聚碳酸酯接头性能研究

张卫 张庆茂 郭亮 张健

(广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘要** 为研究聚碳酸酯激光透射焊接接头性能,采用 10 W 半导体端抽运全固态(DPSS)激光器进行了聚碳酸酯材料的激光透射焊接。采用光学金相显微镜(OM)、场发射扫描电子显微镜(SEM)和电子万能实验拉力机分析了接头的显微形貌、断口形貌和拉伸剪切强度。结果表明,在激光功率 8 W、激光频率 50 kHz、焊接速度 350 mm/s、激光扫描间距 0.1 mm 时,试样的拉伸剪切强度达到 44 MPa,为母材强度的 68%,焊缝内部的分层和气孔是影响接头力学性能和断裂机制的主要原因,通过激光塑料透射焊接技术,可以获得接头力学性能良好的焊接试样。

**关键词** 激光技术;激光焊接;透射焊接;拉伸剪切强度;聚碳酸酯;断口形貌

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0703001

## Research on the Properties of Through-Transmission Laser Welding of Polycarbonate

Zhang Wei Zhang Qingmao Guo Liang Zhang Jian

(Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract** A 10 W diode pumped solid state (DPSS) laser is employed for through-transmission welding of polycarbonate to study the properties of weld joint. Optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and tensile machine are employed for analyzing the morphology of the welded joint, fracture and tensile-shear stress. The results show that under the condition of 8 W laser power, 50 kHz laser frequency, 350 mm/s scanning velocity and 0.1 mm scanning interval, the tensile-shear stresses of the samples are 44 MPa, which research 68% of the basic materials. Layering and pores in the welded joint are the main factors of low mechanical properties and different fracture mechanisms and with this approach we can get weld joint with good mechanical properties.

**Key words** lase technique; laser welding; through-transmission welding; tensile shear strength; polycarbonate; fracture

**OCIS codes** 140.2020; 140.3390; 140.3460; 140.6810

## 1 引言

塑料材料在汽车、航空、通信、包装和医疗等领域已经得到了广泛的应用<sup>[1~3]</sup>。传统的塑料连接方式,如超声波焊接、摩擦焊、热气焊、电阻焊和胶粘接等,对材料或工具有特殊要求,且焊接速度慢,已经无法满足现代塑料工业的需求<sup>[4~6]</sup>。而塑料激光透射焊接技术具有激光能量易于控制、重复周期短、热影响区小、热应力和机械应力低、树脂降解少、可以实现复杂零件的焊接等优点,正得到越来越广泛的

应用<sup>[7~11]</sup>。目前,国外对于塑料激光透射焊接的研究比较深入。在基础理论方面,涉及了焊接过程中的热应力、流场和温度场等<sup>[6,9,12,13]</sup>;在焊接工艺方面,涉及了焊接工艺参数、金属与塑料异种材料的焊接以及吸收剂等<sup>[11,14~18]</sup>,在焊接方法方面,涉及了激光微焊接和衍射焊接等<sup>[19~21]</sup>,在焊接设备方面,多家公司已经推出了专门用于塑料透射焊接的激光设备<sup>[22]</sup>。而国内对塑料激光透射焊接的研究较少,主要集中在激光焊接工艺的研究,且缺乏系统

**收稿日期:** 2012-01-15; **收到修改稿日期:** 2012-03-06

**基金项目:** 中央财政支持地方高校专项资金(510-C10293)、粤港关键技术招标东莞专项(20092052060010)、广东省教育部产学研结合重点项目(2010A090200048)、广东省教育厅学科建设专项(CXZD1139)和华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术研究中心开放基金(2011006)资助课题。

**作者简介:** 张卫(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: wzhang@yeah.net

**导师简介:** 张庆茂(1966—),男,博士,教授,主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: zhangqm@scnu.edu.cn (通信联系人)

性<sup>[23~26]</sup>。目前在塑料激光透射焊接中所采用的激光器主要有 CO<sub>2</sub> 激光器、全固态激光器、光纤激光器和半导体激光器<sup>[1]</sup>,CO<sub>2</sub> 激光器穿透材料的厚度受到限制,仅限于薄膜材料的焊接,Nd:YAG 全固态激光器的转换效率仅为3%,光纤激光器具有良好的光束质量,但造价昂贵。半导体端抽运全固态(DPSS)激光器对塑料材料具有良好的透过性,且转换效率较高,约为 30%,易于实现激光器的小型化和便携化。因此,本文采用 10 W DPSS 激光器进行了塑料激光透射焊接工艺的系统性研究。

## 2 实验材料、设备及方法

### 2.1 实验材料

选用了两种热塑性无定形聚碳酸酯(PC)材料,

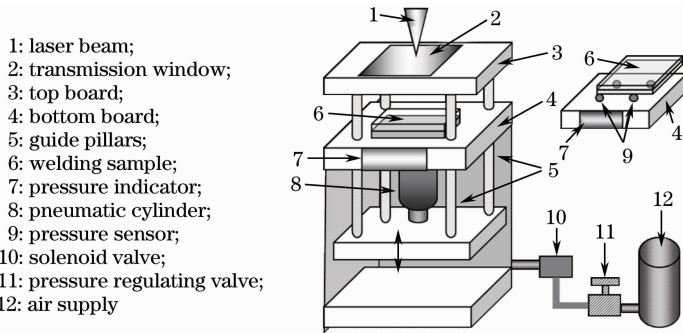


图 1 焊接夹具结构图

Fig.1 Structure of the fixture

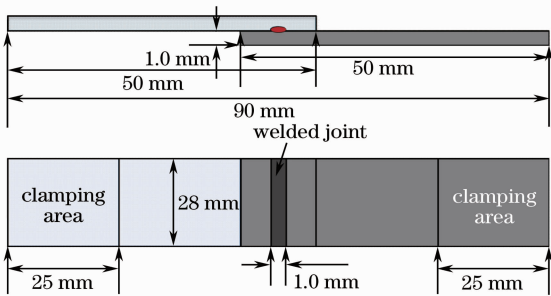


图 2 拉伸剪切强度测试试样尺寸

Fig.2 Size of samples for tensile-shear strength testing

### 2.3 实验方法

采用单参量变化法进行实验设计。焊接工艺参数如表 1 所示。激光移动方向及扫描方式如图 3 所示,其中  $d$  为扫描线间距。光斑直径为 0.10 mm;压紧力为 400 N。

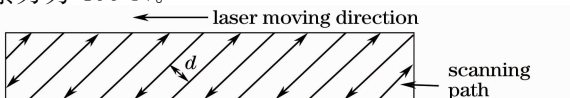


图 3 激光移动及扫描方式示意图

Fig.3 Principle of laser moving and scanning path

一种为透明,一种为不透明,抗拉强度分别为 66.16 MPa和 64.98 MPa,试样几何尺寸为 50 mm×25 mm×2 mm。

### 2.2 实验设备

采用 Violino-2 型 DPSS 激光器,输出功率 0~10 W,重复频率 0~100 kHz,光束质量  $M^2 < 2$ 。实验采用自制的带透射窗口和压力显示的夹具,结构如图 1 所示。采用 UV3101PC 型紫外-可见-红外分光光度计测量材料在激光波长为 1064 nm 时的透射率和反射率。采用 4XC 型光学金相显微镜(OM)观察焊缝显微形貌。采用电子万能实验拉力机进行拉伸剪切强度测试,测试样几何尺寸如图 2 所示。采用 S-4300 型场发射扫描电子显微镜(SEM)观察断口形貌。

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Process design for welding

Parameters	Power / W	Frequency / kHz	Velocity / (mm/s)	Scanning interval / mm
Range	1~10	10~100	150~900	0.05~0.20

## 3 结果与讨论

### 3.1 透射率实验

经测量,两种 PC 对 1064 nm 激光的透射率和反射率如表 2 所示。不透明 PC 的吸收率可以通过下式计算:

$$A = 1 - R - T, \quad (1)$$

表 2 两种 PC 对激光的反射率和透射率

Table 2 Reflection and transmission coefficients

of the two types of polycarbonate

Materials	R / %	T / %
Transparent PC	9.40	90.56
Opaque PC	4.62	0

式中  $A$  为吸收率, $R$  为反射率, $T$  为透射率。测量结果表明,两种材料具有良好的焊接性。

### 3.2 拉伸剪切实验

拉伸剪切强度可以计算为

$$\sigma = N / (W \times L), \quad (2)$$

式中  $N$  为最大载荷,  $W$  为焊缝宽度,  $L$  为焊缝长度。

#### 3.2.1 激光功率对拉伸剪切强度的影响

激光功率对拉伸剪切强度的影响如图 4 所示。研究表明,随着激光功率的升高,拉伸剪切强度逐渐升高,在激光功率约为 8 W 时,达到峰值约 42.5 MPa,约为母材强度的 65%,之后拉伸剪切强度逐渐降低。这是因为当激光功率小于 8 W 时,材料表面的热输入量低,材料的粘性流动不充分,熔融态的高分子链无法充分地进行自身的缔合作用和分子链之间的缠结作用,两种材料的高分子链的交互作用较弱,接头的结合强度较低;当激光功率大于 8 W 时,随着热输入量的增加,高分子链将发生大量的降解反应,生成了低分子量的热降解产物,小分子具有较弱的相互作用,且对较大的分子具有润滑作用,从而导致高分子链间的交互作用减弱,使接头的结合强度降低。

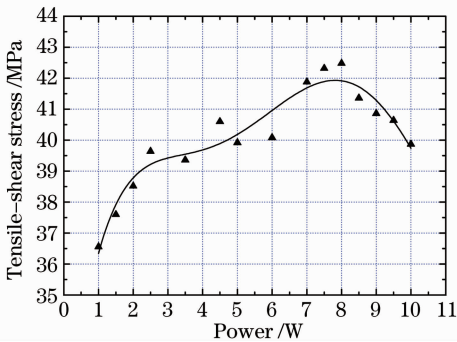


图 4 激光功率对拉伸剪切强度的影响

Fig. 4 Influence of laser power on tensile-shear strength

#### 3.2.2 扫描速度对拉伸剪切强度的影响

扫描速度对拉伸剪切强度的影响如图 5 所示。研究表明,随着扫描速度的增加,拉伸剪切强度逐渐升高,在扫描速度约为 350 mm/s 时,达到峰值约 44 MPa,约为母材强度的 68%,之后拉伸剪切强度逐渐降低。这是因为,当扫描速度小于 350 mm/s 时,随着扫描速度的降低,材料表面的热输入量逐渐升高,高分子链发生大量的降解反应,生成了低分子量的降解产物,由于小分子间的相互作用较弱和对大分子的润滑作用,导致高分子链的交互作用减弱,使接头的结合强度降低;当扫描速度大于 350 mm/s 时,随着扫描速度的增加,材料表面的热输入量降低,材料的粘性流动不充分,两种材料的高分子链自身的缔合作用和分子链之间的缠结作用减弱,高

分子链的交互作用减弱,导致了接头结合强度降低。

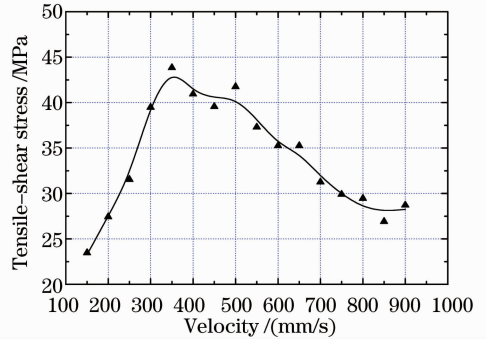


图 5 扫描速度对拉伸剪切强度的影响

Fig. 5 Influence of scanning velocity on tensile-shear strength

#### 3.2.3 激光频率对拉伸剪切强度的影响

激光频率对拉伸剪切强度的影响如图 6 所示。研究表明,随着激光频率增加,拉伸剪切强度逐渐升高,当激光频率为 50 kHz 时,达到峰值约 44 MPa,约为母材强度的 68%,之后拉伸剪切强度逐渐降低。这是因为,当激光频率小于 50 kHz 时,随着激光频率的增加,激光在单位时间内发射的脉冲数量增加,材料表面在单位时间单位面积内吸收的能量升高,熔合区材料的粘性流动充分,熔融态的高分子链可以充分地进行自身的缔合作用和分子链之间的缠结作用,高分子链的交互作用较强,两种材料可以牢固结合,接头强度呈现出升高的趋势。当激光频率大于 50 kHz 时,过高的热效应导致了材料的高分子链热降解为低分子量的降解产物,由于小分子间的相互作用较弱和对大分子的润滑作用,导致高分子链的交互作用减弱,使接头的强度降低。

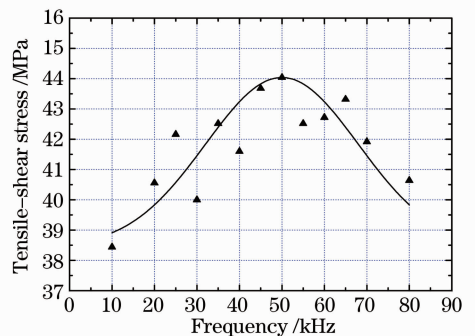


图 6 激光频率对拉伸剪切强度的影响

Fig. 6 Influence of laser frequency on tensile-shear strength

#### 3.2.4 激光扫描间距对拉伸剪切强度的影响

激光扫描间距对拉伸剪切强度的影响如图 7 所示。研究表明,随着激光扫描间距的增加,拉伸剪切强度逐渐升高,当激光扫描间距为 0.10 mm 时,达

到峰值约 40 MPa,约为母材强度的 62%,之后拉伸剪切强度逐渐降低。这是因为,当线扫描间距小于 0.10 mm 时,在激光扫描过程中,扫描线之间存在一定的重叠率,材料表面存在二次加热区,塑料材料被二次加热熔融,且随着线扫描间距的减小,二次加热区变大,如图 8(a)和(b)所示,材料在单位面积内吸收的有效能量也变高,高分子链的热降解程度加大,低分子量的降解产物增加,试样的拉伸剪切强度较低。当线扫描间距大于 0.10 mm 时,扫描线之间存在间隙,导致激光在材料表面存在空白作用区,如图 8(d)和(e)所示,随着空白作用区的增加,材料在单位面积内吸收的有效能量减少,材料不能进行充分的粘性流动。因此,试样的拉伸剪切强度开始

降低。

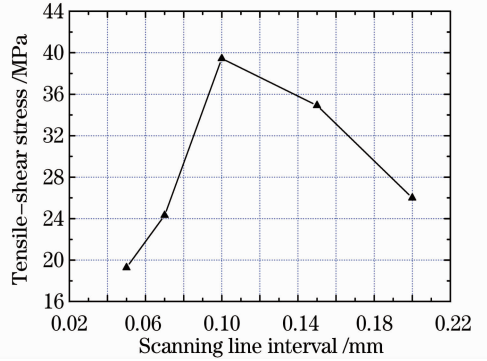


图 7 激光扫描间距对拉伸剪切强度的影响  
Fig. 7 Influence of scanning line interval on tensile-shear strength

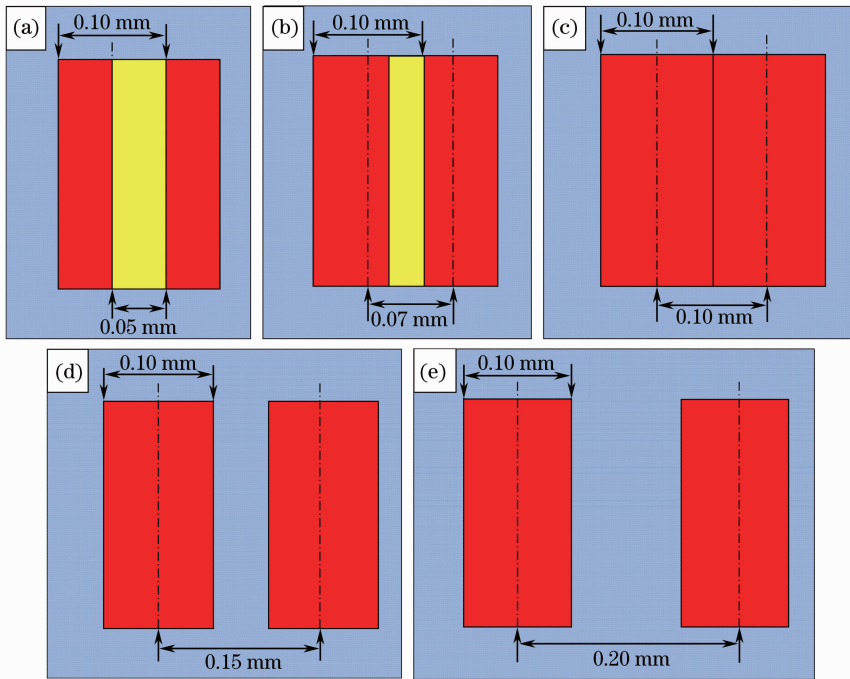


图 8 不同扫描间距的扫描线重叠率示意图

Fig. 8 Diagram of scanning line overlap of different scanning line intervals

### 3.3 焊缝形貌分析

图 9 所示为不同工艺参数下的焊缝形貌。选取焊缝深度  $D$  表征不同工艺参数下激光能量对焊缝形貌的影响,如图 9(a)所示。研究表明,随着激光热输入量的减少,焊缝深度  $D$  逐渐变浅,焊缝中心烧蚀区逐渐变小,焊缝分层逐渐减小,气孔数量逐渐减少,在焊接速度为 400 mm/s 时,已观察不到烧蚀区域和分层,且气孔消失。结果表明,随着烧蚀区和分层的逐渐消失,拉伸剪切强度逐渐升高,在 350 mm/s 时达到峰值约 44 MPa,约为母材强度的 68%,如图 5 所示。但此时仍有约 86  $\mu\text{m}$  的气孔存在,如图 9(c)所示。当速度大于 350 mm/s 时,随着

焊缝深度的降低,拉伸剪切强度又逐渐降低。

### 3.4 断口形貌分析

选取扫描速度为 150, 350, 800 mm/s 时的拉伸试样进行断口形貌分析。图 10 表明,当扫描速度为 150 mm/s 时,在拉伸剪切力的作用下,低分子量的热降解产物粘附在一侧材料的表面被剥离下来。在断口边缘可以观察到大量的气体孔洞,如图 10(b)所示;在断口中心区域可以观察到颗粒状的热降解产物和阶梯状断口形貌,如图 10(c)所示,为脆性断裂。这是因为,在过高的热效应作用下,高分子链大量降解,在焊缝处形成了中心烧蚀区,焊缝内部出现了分层,且在降解过程中生成的气体向焊缝两端扩



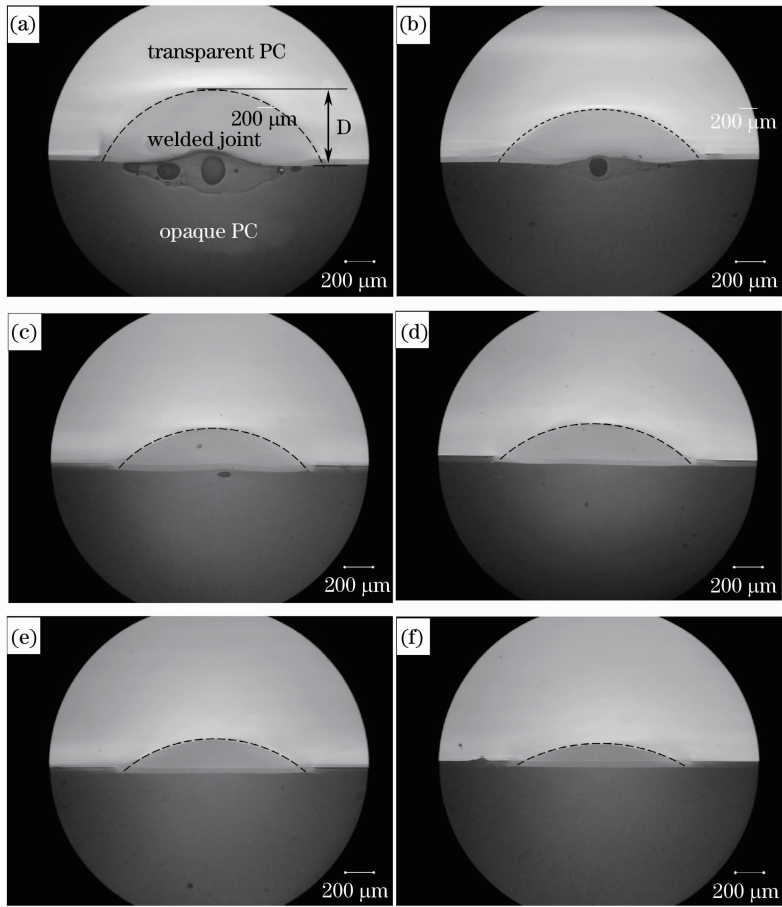


图 9 不同焊接速度下的焊缝形貌。(a) 150 mm/s;(b) 250 mm/s;(c) 350m m/s;(d) 400 mm/s;  
(e) 550 mm/s;(f) 800 mm/s

Fig.9 Morphology of the joint under different welding velocities. (a) 150 mm/s; (b) 250 mm/s;  
(c) 350 mm/s; (d) 400 mm/s; (e) 550 mm/s; (f) 800 mm/s

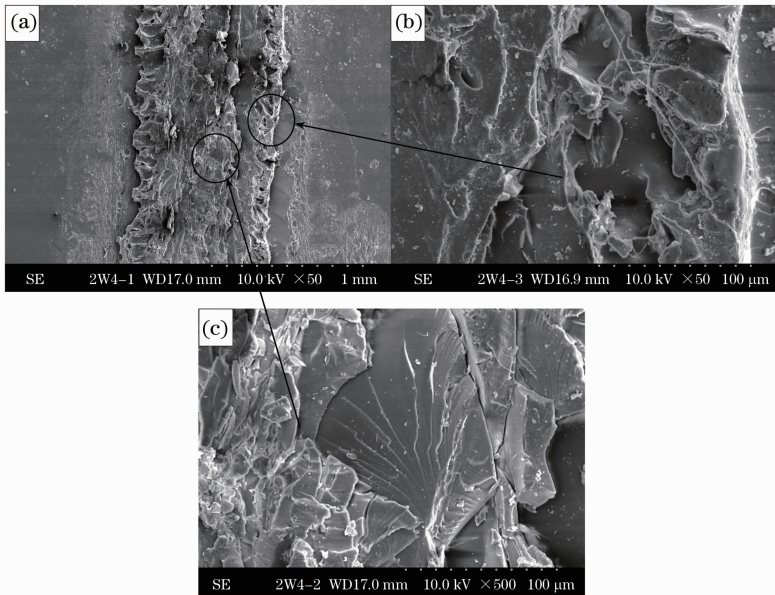


图 10 扫描速度为 150 mm/s 时的断口形貌。(a)放大 50 倍;(b)放大 500 倍;(c)放大 200 倍  
Fig.10 SEM photos of fracture under 150 mm/s scanning velocity. (a) Magnified 50 times;  
(b) magnified 500 times; (c) magnified 200 times

散逃逸,在焊缝内部和边缘形成了气孔,如图 9(a)所示,断裂首先从焊缝边缘开始,并由不同位置的气孔边缘和材料分层面所造成的不平衡应力场诱导裂纹的扩展,使焊缝最终断裂。结果表明,分层和气孔导致断口出现了颗粒状的热降解产物、气体孔洞和阶梯状形貌,为脆性断口,并使接头结合力下降,拉伸剪切强度较低,约为 23 MPa,如图 5 所示。

图 11 表明,当扫描速度为 350 mm/s 时,在拉伸剪切力的作用下,起裂点处形成了约 0.1 mm 的剥离区。如图 11(b)所示,断口中心存在大量类似抛物线型的撕裂棱;如图 11(c)所示,断裂终止处存

在较小的撕裂棱;如图 11(d)所示,断口表现为局部延性撕裂特性,为韧性和脆性的混合型断口。这是因为,此时材料表面的热效应适中,焊缝内部没有明显的烧蚀区和分层,且气孔较少,熔融材料粘性流动至了界面较深的一层,约 0.25 mm,如图 9(c)所示,此时焊缝较深,两种材料完全融合在一起,高分子链的交互作用力强,断口表现为局部延性撕裂特性。结果表明,分层和气孔的减少,使断口表现出局部延性撕裂的特性,为韧性和脆性的混合型断口,并使接头拉伸剪切强度提高,约为 44 MPa,如图 5 所示。

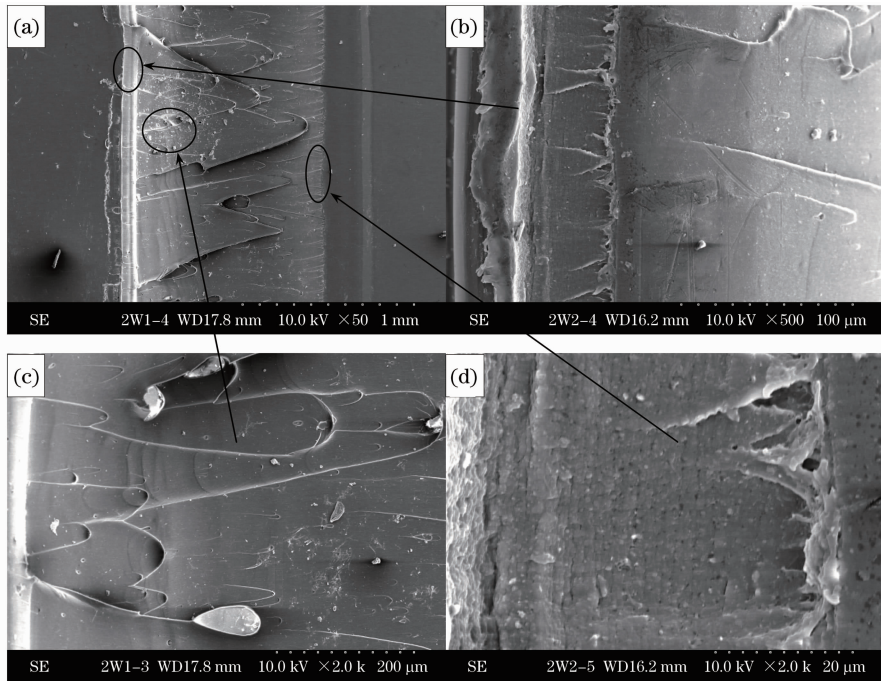


图 11 扫描速度为 350 mm/s 时的断口形貌。(a)放大 50 倍;(b)放大 500 倍;(c)放大 200 倍;(d)放大 2000 倍  
Fig. 11 SEM photos of fracture under 350 mm/s scanning velocity. (a) Magnified 50 times; (b) magnified 500 times; (c) magnified 200 times; (d) magnified 2000 times

图 12 表明,当扫描速度为 800 mm/s 时,接头断口大部分区域较为平坦,断口表面存在较多较浅的韧窝,为韧性断裂。这是因为,此时材料表面的热

效应较低,熔融材料仅在界面处较浅的一层约 0.12 mm 的深度范围内发生了粘性流动,如图 9(f)所示,此时焊缝较浅,高分子链的交互作用力较弱。

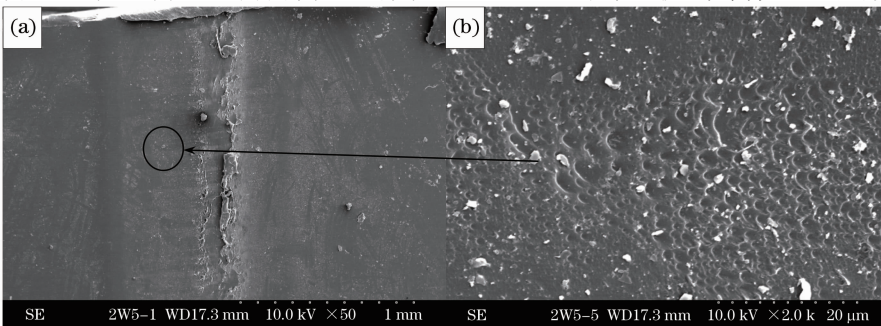


图 12 扫描速度为 800 mm/s 时的断口形貌。(a)放大 50 倍;(b)放大 2000 倍  
Fig. 12 SEM photos of fracture under 800 mm/s scanning velocity. (a) Magnified 50 times; (b) magnified 2000 times

结果表明,焊缝深度较浅,断口形貌较为平坦,为韧性断口,使接头拉伸剪切强度较低,约为 29 MPa,如图 5 所示。

## 4 结 论

1) 测量了两种 PC 对 1064 nm 激光的透射率和吸收率,透明 PC 的透射率为 90.56%,不透明 PC 的吸收率为 95.38%,两种材料表现出了良好的可焊性。

2) 分析得出,基于 10 W DPSS 激光器获得的最优工艺参数为:激光功率 8 W,激光频率 50 kHz,焊接速度 350 mm/s,线扫描间距 0.10 mm,此时的焊接试样强度约为 44 MPa,达到了母材强度的 68%。

3) 造成接头强度低的主要原因是分层和气孔。有效地控制激光能量,消除分层和气孔,减少焊缝的内部缺陷,可以获得力学性能良好的焊接试样。

4) 由于激光热输入量的影响,接头的断裂机制为脆性和韧性的混合断裂机制。

**致谢** 作者衷心感谢为本研究提供激光焊接平台的深圳市智强力镭射科技有限公司。

## 参 考 文 献

- 1 Yasuo Kurosaki, Kimitoshi Satoh. A fiber laser welding of plastics assisted by transparent solid heat sink to prevent the surface thermal damages [J]. *Physics Procedia*, 2010, **5**: 173~181
- 2 H. T. Sánchez, P. Sánchez, M. Estrems. SCADA system improvement in PVC high frequency plastic welding[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2009, **40**: 84~94
- 3 Negin Amanat, Cedric Chaminade, John Grace. Transmission laser welding of amorphous and semi-crystalline poly-ether-etherketone for applications in the medical device industry [J]. *Materials and Design*, 2010, **31**: 4823~4830
- 4 Brian G. Bryden. Welding of plastics with high power diode lasers[J]. *The Industrial Robot*, 2004, **31**(1): 30~33
- 5 Ian Jones. Laser welding for plastic components[J]. *Assembly Automation*, 2002, **22**(2): 129~135
- 6 Yasuo Kurosaki. Radiative heat transfer in plastic welding process[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, **93**(1-3): 25~41
- 7 J. P. Coelho, M. A. Abreu, M. C. Pires. High-speed laser welding of plastic films[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2000, **34**(2000): 385~395
- 8 Edmund Haberstroh. Wolf-Martin Hoffmann, Reinhart Poprawe. Laser transmission joining in microtechnology [J]. *Microsyst Technol.*, 2006, **12**(7): 632~639
- 9 E. Haberstroh, W. M. Hoffmann. Laser transmission welding of complex micro plastic parts[C]. Proc. IMechE Part B: J. Engineering Manufacture, 2007, **222**: 47~54
- 10 M. Geiger, T. Frick, M. Schmidt. Optical properties of plastics and their role for the modeling of the laser transmission welding process[J]. *Prod. Engng. Res. Devel.*, 2009, **3**(1): 49~55
- 11 M. Ilie, E. Cicala, D. Grevey *et al.*. Diode laser welding of ABS: Experiments and process modeling [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2009, **41**(5): 608~614
- 12 David Grewell, Avraham Benatar. Modeling heat flow for a distributed moving heat source in micro-laser welding of plastics [C]. Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications, 2004, **712**: 1271~1276
- 13 H. Potente, Fieglerg. Laser transmission welding of thermoplastics modelling of flows and temperature profiles[C]. Annual Technical Conference-ANTEC, Conference Proceedings, Brookfield, United States; Society of Plastics Engineers, 2004, 1193~1199
- 14 James D. Van de Ven, Arthur G. Erdman. Laser transmission welding of thermoplastics-part I temperature and pressure modeling [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2007, **129**(10): 849~858
- 15 V. A. Kangan, G. P. Pinho. Laser transmission welding of semicrystalline thermoplastics-part II analysis of mechanical performance of welded nylon[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2004, **3**(1): 95~107
- 16 A. Mian, G. Newaz, L. Vendra *et al.*. Laser bonded microjoints between titanium and polyimide for applications in medical implants [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2005, **16**(3): 229~237
- 17 J. Anon. Additives aid laser welding[J]. *Plastics, Additives and Compounding*, 2005, **7**(1): 34~35
- 18 A. Fortunato, G. Cuccolini, A. Ascari *et al.*. Hybrid metal-plastic joining by means of laser[J]. *Int. J. Mater. Form.*, 2010, **3**(1): 1131~1134
- 19 Jiewei Chen, Jerry Zybko, James Clements. Diode laser bonding of planar MEMS, MOEMS, & Microfluidic devices [C]. Warrendale: Materials Research Society Symposium Proceedings, 2005, **872**: 309~316
- 20 David Grewell, Avraham Benatar. Diffractive optics as beam-shaping elements for plastics laser welding[J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(11): 118001
- 21 Anthony P. Hoult. Laser welding of polymer micro-fluidic devices using novel diode laser sources [C]. *SPIE*, 2003, **5063**: 308~313
- 22 Liu Huixia, Zhang Huizhong, Ji Jinqing *et al.*. Methods and present status of laser welding of lastics[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(2): 166~170  
刘会霞, 张惠中, 季进清等. 激光焊接塑料的方法及发展现状[J]. *激光技术*, 2008, **32**(2): 166~170
- 23 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
- 24 Wei Hong, Wang Chuanxiang. Technics and performance research of laser transmission welding polycarbonate plastics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1103003  
韦宏, 王传祥. 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
- 25 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
- 26 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