

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0156-05

# 热塑性聚氨酯弹性体薄膜激光透射焊接工艺

刘会霞 李 品 邢 安 袁晓明 向宝珍 王 霄

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 为了揭示具有良好生物相容性的医用聚合物材料的连接、封装工艺,采用激光透射焊接工艺,对 0.12 mm 厚热塑性聚氨酯弹性体薄膜(TPU)进行激光焊接,研究了激光器平均功率、焊接速度等主要工艺参数对焊缝质量的影响。结果表明,使用 Clearweld 吸收剂,焊缝颜色和母材颜色基本一致,可实现透明对透明材料的无色焊接;在焊接速度  $V=100$  mm/min,激光器平均功率  $P$  从 0.31 W 增加到 8.11 W 时,焊缝宽度从 0.86 mm 增加到 4.10 mm,在  $P$  大于 2.3 W 时,焊缝处材料出现分解,在  $P$  大于 7.15 W 时出现烧蚀。但在激光器平均功率  $P$  为 0.60~5.89 W 时,焊缝剥离强度均大于 1.3 N/mm。固定激光器平均功率,通过调整焊接速度,可获得 TPU 激光透射焊接工艺参数窗口,表明通过激光器平均功率和焊接速度的匹配,在保证焊接质量的前提下,能够为 TPU 薄膜激光透射焊接选取合理的工艺参数。

**关键词** 激光技术; 激光透射焊接; 热塑性聚氨酯弹性体; 焊接工艺参数; 焊接质量

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0156

## Laser Transmission Welding of Thermoplastic Polyurethane Films

Liu Huixia Li Pin Xing An Yuan Xiaoming Xiang Baozhen Wang Xiao

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

**Abstracts** 0.12 mm thick films of thermoplastic polyurethane (TPU) are welded using laser transmission welding technology. The effect of main welding parameters including laser average power, welding speed on welding quality is investigated. The results show that using Clearweld resins, the color of welding seam is similar to parent material's, and colorless welding is obtained. The experimental results show that at the welding speed of 100 mm/min, with increasing of laser average power from 0.31 W to 8.11 W, the seam width increases from 0.86 mm to 4.10 mm. When the laser average power is larger than 2.30 W, the material is decomposed in the weld seam. When the laser average power is larger than 7.15 W, the material is ablated. And the peeling strength is all more than 1.3 N/mm during the laser average power from 0.6 W to 5.89 W. Adjusting welding speed and fixing the laser average power, parameter window for laser transmission welding is obtained. The results show that with the matching of laser average power and welding speed, the welding speed can be increased by the premise of guarantee of weld seam quality.

**Key words** laser technique; laser transmission welding; thermoplastic polyurethane; welding parameters; welding quality

## 1 引 言

激光透射焊接是一种非接触式焊接方法,具有焊接无残渣、无飞边、焊接过程精度高,速度快,无振动等优点,在电子元器件、汽车零部件和包装工业等领域均有应用<sup>[1~3]</sup>。特别在生物医疗领域,聚合物材料因其良好的生物相容性,在医疗器械中应用越来越广泛,激光透射焊接聚合物作为产品连接、封装

工艺受到普遍重视<sup>[4,5]</sup>。现阶段,已用于一次性生物微流控芯片的封装<sup>[6]</sup>以及用于牙齿修补过程中支撑模块的焊接<sup>[7]</sup>等。

热塑性聚氨酯弹性体(TPU)具有优异的机械性能和良好的化学性能,而且与人体组织有着良好的生物相容性和血液相容性,使其成为一种优良的医用材料,可用于制造人工心脏瓣膜、气管、导液管

**作者简介:** 刘会霞(1964—),女,教授,主要从事激光加工和表面微细造型数值模拟和实验、数字化设计与制造技术等方面的研究。E-mail: lhx@ujs.edu.cn

等,在心脏起搏器、骨科矫形器和人工肺等人体植入设备中也有应用<sup>[8~10]</sup>。而许多医疗器械的终端产品是由连接(焊接)加工而成,因此研究热塑性聚氨酯弹性体连接(焊接)工艺具有良好的应用前景。

本文使用 Nd:YAG 脉冲激光器进行了 0.12 mm 厚 TPU 薄膜的激光透射焊接试验,重点研究了激光平均功率、焊接速度等主要焊接工艺参数对焊缝宽度和焊缝剥离强度的影响,并对不同工艺情况下的焊缝形貌进行了观察分析。

## 2 激光透射焊接的基本原理和试验方案

### 2.1 激光透射焊接的基本原理

聚合物焊接的基本原理是热熔融状态下的聚合物大分子在焊接压力的作用下相互扩散,产生范德华力,从而紧密地粘在一起。聚合物焊接的必要条件为:1)焊接温度——造成塑料的熔融与流动;2)焊接压力——促进塑料大分子相互间的扩散并挤入焊缝中的残余间隙;3)作用时间——在某段时间内聚合物从加热、熔融到冷却固化,建立起足够的焊接强度<sup>[11]</sup>。

激光透射焊接的先决条件就是两被焊件一个能够透过激光而另一个吸收激光能量<sup>[12~14]</sup>,如图 1 所示。在焊接开始前,被焊零件相互接触,将激光光束作用于待焊接区域,激光光束透过上层零件,然后在两零件接触面(即焊接区域)被另一个零件吸收,形成热作用区;热作用区(即两零件接触面)中的塑料被熔化,热熔状态下的塑料大分子在焊接压力的作用下互相扩散,在凝固过程中已熔化的材料形成焊接接头,被焊件即被连接起来。

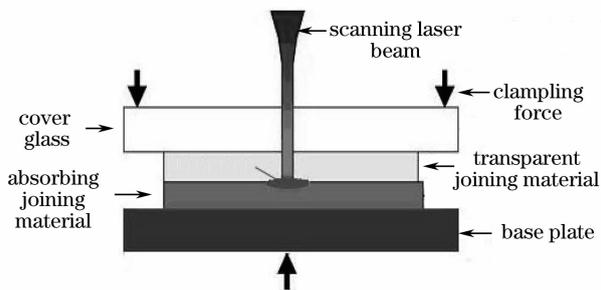


图 1 激光透射焊接基本原理示意图<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of laser transmission welding

### 2.2 试验材料与焊前准备

试验使用 0.12 mm 厚透明热塑性聚氨酯薄膜,试样尺寸 30 mm×10 mm×0.12 mm,焊接前用丙酮轻微擦拭,并迅速用热风烘干,以除去试样表面的油污及低分子析出物。

吸收剂是激光透射焊接工艺关键技术之一。

1998 年英国焊接协会(TWI)申请了 Clearweld 吸收剂专利,此种吸收剂在可见光波长范围内能够透射光波,但吸收红外光波,使透射焊接技术摆脱了对碳黑的依赖,实现了透明对透明材料的激光透射焊接<sup>[2,15]</sup>。试验中,使用由 Gentex 公司(Clearweld 吸收剂商业化生产厂家)提供的 1000 nm 波长吸收剂。

### 2.3 试验设备及方法

激光焊接系统采用德国 Rofin 公司 StarWeld 250 型 Nd:YAG 脉冲激光器,最大平均功率 250 W,波长 1060 nm,模式为多模,焦距 110 mm。激光器平均功率由脉宽、电压和频率共同决定,在小功率状况下,焊接前使用中国计量研究所 P1000 型激光功率计测量得到平均功率,功率不稳定性小于±5%。焊接系统配备三轴联动工作台,台面行程 300 mm×300 mm×200 mm,速度 0~3000 mm/min。

试验采用顺序周线型搭接焊,影响焊接质量的主要工艺参数包括:激光器平均功率、焊接速度、离焦量、焊接压力等。试验中,焊接压力选取 1 MPa。为了有效减小焊缝宽度,使用正焦点焊接(即光束焦点位于两被焊件接触面处)。调整激光器平均功率和焊接速度获得一系列焊缝,使用体式显微镜对焊缝形貌进行观测。焊接后,参考 GBT2791-1995(胶粘剂 T 剥离强度试验方法挠性材料对挠性材料)进行了剥离强度试验确定焊缝强度。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 焊缝形貌

平均功率  $P=0.60$  W,焊接速度  $V=100$  mm/min 时,焊接样品的宏观图片及焊缝处局部放大图如图 2。从宏观图片中可以看出,样品成形美观,表面无破损,焊缝均匀平滑,无明显缺陷。从焊缝局部放大图可以看出,焊缝焊趾清晰,在焊缝区域内浅棕色 Clearweld 吸收剂在焊接热量的作用下已经分解,焊缝透明和母材颜色接近,实现了透明对透明材料的无色焊接。

焊接速度  $V=100$  mm/min,激光器平均功率  $P$  为 0.60 W,2.3 W,4.48 W,7.15 W 时焊缝的典型形貌如图 3 所示。从图中可以看出随着平均功率的增加,被焊件吸收热量增加,试样逐渐出现分解,最终烧蚀。在  $P=0.60$  W 时,焊接效果最佳,焊缝成型良好,未出现明显焊接缺陷;当  $P=2.3$  W 时,材料部分热分解出现少量气泡,但焊趾比较清晰;当  $P=4.48$  W 时,材料严重分解,气泡大量出现,焊趾模糊;当  $P=7.15$  W 时,材料灼烧,表面出现沟槽,

能看到明显的碳化物。

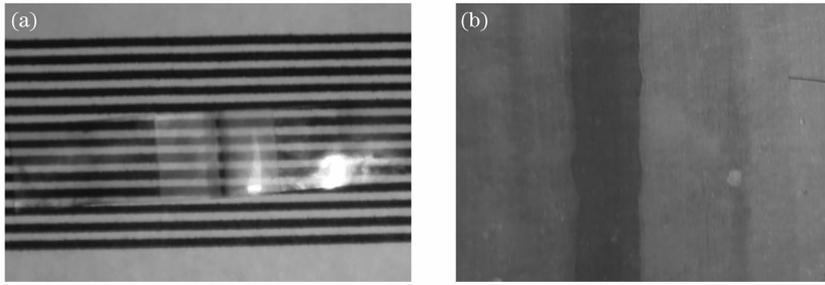


图 2 (a)焊接样品宏观图片;(b)焊缝局部放大图

Fig. 2 (a) The welding specimen; (b) a zoom-in view of welding seam

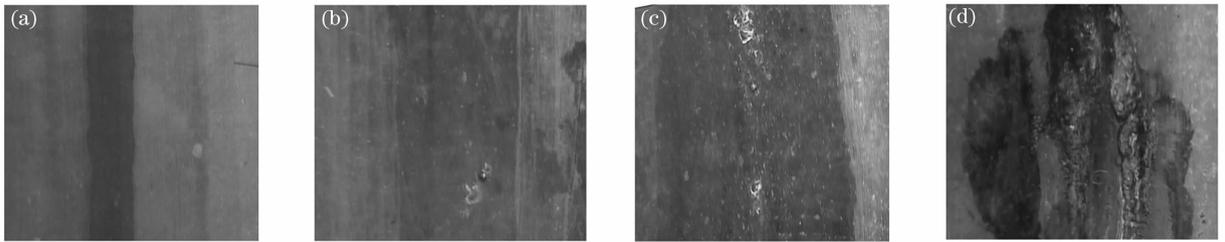


图 3 4 种典型的焊缝形貌(焊接速度  $V=100$  mm/min)。 (a)  $P=0.60$  W; (b)  $P=2.30$  W; (c)  $P=4.48$  W; (d)  $P=7.15$  W

Fig. 3 Four representative welding morphologies (welding speed  $V=100$  mm/min). (d)  $P=0.60$  W;

(b)  $P=2.30$  W; (c)  $P=4.48$  W; (a)  $P=7.15$  W

### 3.2 激光平均功率对焊接质量的影响

当激光器使用功率较小时,频率为 35 Hz 时平均功率较为稳定。固定频率  $f=35$  Hz,调整脉宽和电压,在焊接速度  $V=100$  mm/min 时,选取 0~9 W 之间的 20 组参数进行焊接试验。焊缝宽度和焊缝剥离强度与激光平均功率的关系如图 4,图 5 所示。

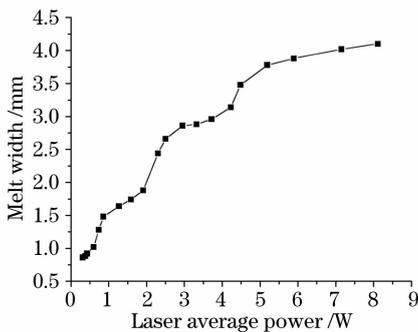


图 4 激光平均功率对焊缝宽度的影响

Fig. 4 Effect of laser average power on the melt width

从图 4 中可以看出,焊缝宽度随着激光平均功率的增大而变宽,由最小值 0.86 mm 上升到最大值 4.10 mm。而在  $P$  大于 4.48 W 时,焊缝变宽的趋势放缓。这是因为,在光斑直径不变的情况下,被焊件吸收能量的范围不变,而此区域外材料的熔化主要依靠热传导来实现,导致激光平均功率对焊缝宽度的影响变小。

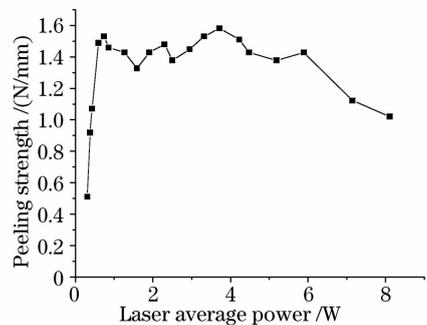


图 5 激光平均功率对焊缝剥离强度的影响

Fig. 5 Effect of laser average power on the peeling strength

从图 5 可以看到,激光平均功率从 0.31 W 上升到 0.60 W 时,焊缝剥离强度从 0.51 N/mm 上升到 1.49 N/mm;在激光平均功率  $P$  在 0.60 W 到 5.89 W 之间时,剥离强度稳定在 1.37~1.58 N/mm 范围内;当激光功率继续上升时,剥离强度有所下降,在  $P=8.11$  W 时,降低到 1.02 N/mm。

试样剥离破坏后的几种形貌如图 6 所示。图 6(a)为在功率  $P=0.38$  W 时,试样在焊接面处被剥离;图 6(b)为功率  $P=0.74$  W 时试样从焊接面处被撕裂;图 6(c)为在功率  $P=5.19$  W 时试样在焊趾处被拉断。当功率很低时,被焊接材料吸收热量不够,材料中大分子链的扩散未能充分完成,导致焊接强度不足。当功率增加时,情况逐步改善。

功率达到  $P=0.60\text{ W}$  时,焊缝完全成形。此后,功率增加,材料逐步出现分解,但是对焊趾处的影响较小,被焊件剥离强度仍能保持在一个很高的强度上。

但是,当功率过高,材料燃烧,焊接剥离强度出现了下降。



图 6 剥离破坏后的试样形貌。(a)  $P=0.38\text{ W}$ ; (b)  $P=0.74\text{ W}$ ; (c)  $P=5.19\text{ W}$

Fig. 6 Sample after peeling. (a)  $P=0.38\text{ W}$ ; (b)  $P=0.74\text{ W}$ ; (c)  $P=5.19\text{ W}$

### 3.3 焊接速度对焊接质量的影响

在激光器平均功率  $P=0.60\text{ W}, 2.30\text{ W}, 4.48\text{ W}$  时,选取不同的焊接速度进行试验。焊缝宽度与焊接速度、焊缝剥离强度与焊接速度的关系如图 7, 图 8 所示。

为  $1.02\text{ mm}$ 。从图 8 中可以看出,随着焊接速度的增加焊缝剥离强度降低。但是都存在一个速度范围,在此范围内,焊缝剥离强度保持在很高的水平上。当功率  $P=2.30\text{ W}$  时焊接速度  $V$  在  $50\text{ mm/min}$  至  $600\text{ mm/min}$  范围内,剥离强度均在  $1.30\text{ N/mm}$  之上。但在速度小于  $310\text{ mm/min}$  时,焊缝处出现了不同程度的材料分解。

焊缝强度和焊缝外观都是影响焊接质量的重要指标。通过对焊接试样外观的观测和对焊缝强度的测量,得到 TPU 薄膜焊接的工艺参数窗口,如图 9 所示。

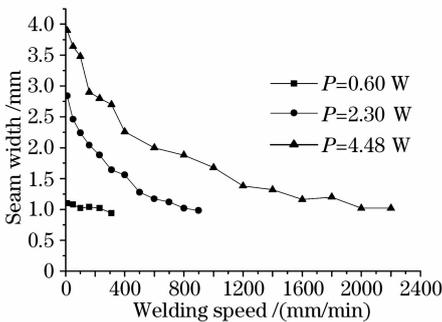


图 7 焊接速度对焊缝宽度的影响

Fig. 7 Effect of welding speed on seam width

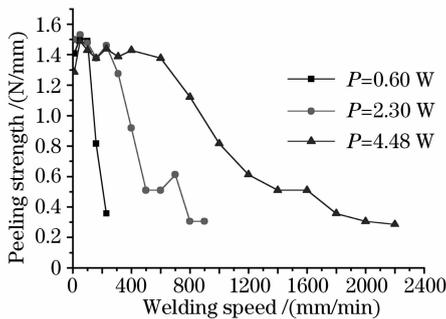


图 8 焊接速度对焊缝剥离强度的影响

Fig. 8 Effect of welding speed on peeling strength

如图 7 所示,在各平均功率下,焊缝宽度随着焊接速度的增加而减小。焊接速度增加,导致被焊件吸收热量较少,熔化的范围较窄,焊缝宽度变小。在功率  $P=4.48\text{ W}$ ,焊接速度为  $10\text{ mm/min}$  时,焊缝宽度为  $3.90\text{ mm}$ ,当  $V=2200\text{ mm/min}$  时焊缝宽度

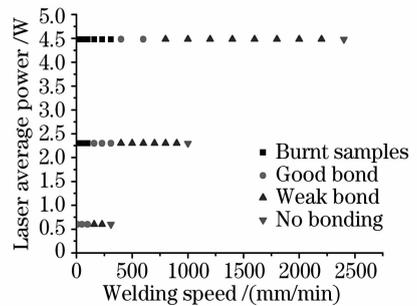


图 9 焊接工艺参数窗口

Fig. 9 Parameter window for laser transmission welding

从图 9 可以看出,激光输入能量是影响焊接质量的首要因素,通过合理组合激光平均功率和焊接速度,可以在保证焊接质量的前提下,提高焊接速度。

## 4 结 论

1) 激光透射焊接适用于 TPU 薄膜,焊接强度能够高于母材。

2) 在 TPU 薄膜的激光透射焊接试验中,使用 Clearweld 吸收剂,可以得到与母材颜色基本一致的焊缝,实现了激光透射焊接工艺对透明材料的无色

焊接。

3) 在焊接速度  $V=100$  mm/min 时,随着激光器平均功率的增大焊缝宽度增加,焊缝处材料逐渐发生分解。但是在功率  $P=0.60$  W 至  $P=5.89$  W 范围内,焊缝剥离强度均大于  $1.3$  N/mm。

4) 在试验的基础上得到了 TPU 薄膜激光透射焊接的工艺参数窗口,可为 TPU 薄膜激光透射焊接时选取合适的工艺参数提供参考。

### 参 考 文 献

- Bachmann F. G., Russek U. A.. Laser welding of polymers using high power diode lasers[C]. The International Society for Optical Engineering. Photon Processing in Microelectronics and Photonics, San Jose, CA, United States, 2002, **4637**: 505~518
- Hilton P. A., Jones I. A., Kennish Y.. Transmission laser welding of plastics[C]. The International Society for Optical Engineering. First International Symposium on High-Power laser Macroprocessing, Osaka, Japan, 2002, **4831**: 44~52
- Zhang Shengyu. Laser welding of plastics[J]. *Modern Chemical Industry*, 2000, **20**(4): 55~57  
张胜玉. 塑料激光焊接[J]. 现代化工, 2000, **20**(4): 55~57
- Jianjun Lai, Hui Yuan, Xianjian Yi *et al.*. Laser bonding of multilayer polymer microfluidic chips[C]. *SPIE*, 2005, **5628**: 56~62
- Chen Xiqu, Lai Jianjun, Liu Sheng *et al.*. Research on laser assisted bonding and packaging system for plastic biochips[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2003, **7/8**: 254~256  
陈西曲, 赖建军, 刘 胜 等. 塑料生物芯片的激光焊接封装系统研究[J]. 微纳电子技术, 2003, **7/8**: 254~256
- Andrei B., Alexander O., Arnold G.. Fibre laser welding for packaging of disposable polymeric microfluidic-biochips [J]. *Appl. Sur. Sci.*, 2007, **254**(4): 1174~1178
- Hustedt M., Busse A. V., Fargas M. *et al.*. Laser micro welding of polymeric components for dental prostheses [C]. *SPIE*, 2006, **6107**: 610706
- Huang Maosong. Thermoplastic polyurethane[J]. *New Material Industry*, 2007, (10): 33~36  
黄茂松. 热塑性聚氨酯弹性体技术与市场发展近况[J]. 新材料产业, 2007, (10): 33~36
- Xu Xiaodong, Dong Xiangzhong, Mo Jianhua *et al.*. Application of the polyurethane film[J]. *Engineering Plastic Application*, 2003, **31**(11): 36~38  
许晓东, 董祥忠, 莫健华 等. 聚氨酯薄膜的应用[J]. 工程塑料应用, 2003, **31**(11): 36~38
- Yao Ying. Current situation and prospects of polyurethane elastic materials[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2003, **1**(4): 29~31  
姚 莹. 聚氨酯弹性体材料现状与展望[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2003, **1**(4): 29~31
- Chen Guo, Xia Yiran, Kong Lingbin *et al.*. Plastics welding technology and its application in medical product[J]. *Engineering Plastics Application*, 2003, **31**(9): 35~38  
陈 国, 夏毅然, 孔令斌 等. 塑料焊接技术及其在医用制品中的应用[J]. 工程塑料应用, 2003, **31**(9): 35~38
- 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
- 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
- Hoult A. P.. Laser welding of polyer micro-fluidic devices using novel diode laser sources[C]. *SPIE*, 2003, **5063**: 309~313
- Jones I.. Laser welding for plastic components[J]. *Assembly Automation*, 2002, **22**(2): 129~135