

# 铜膜宽度对聚碳酸酯焊接强度及焊缝形貌特征影响的研究

于晓东, 姜沐晖, 张功达, 王传洋\*

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

**摘要** 使用半导体激光器透射焊接聚碳酸酯(PC)板材,对比了以涂抹有碳黑的金属铜膜(CWCB)作为激光吸收层和以碳黑(CB)作为激光吸收层的 PC 件的可焊性差异,进一步分析了 CWCB 宽度对焊接件的结构特征、焊缝变形、残余应力和焊接强度的影响。结果表明:与 CB 相比,CWCB 作为激光吸收层的焊缝区域气泡的数目较少,焊缝中的 CWCB 有明显的变形。随着 CWCB 宽度的增加,变形深度和变形面积增加,当 CWCB 的宽度超过 2.5 mm 时,变形深度和变形面积逐渐下降,焊缝边缘的溢出高度为 386.32~392.26  $\mu\text{m}$ 。残余应力与焊缝宽度随着 CWCB 宽度的增加而增加。CWCB 宽度为 1 mm 时焊接件具有最大的焊接强度 21.5 MPa,之后随着 CWCB 宽度的增加,焊接强度逐渐减小。

**关键词** 激光技术; 激光透射焊接; 激光吸收层; 焊接强度; 焊缝形貌特征; 残余应力

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1414001

## Influences of Copper Film Width on Polycarbonate Welding Strength and Weld Morphological Characteristics

Yu Xiaodong, Jiang Muhui, Zhang Gongda, Wang Chuanyang\*

School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

**Abstract** The semiconductor laser was used to achieve the transmission welding of polycarbonate (PC) parts. The influences of two kinds of laser absorbers, carbon black (CB) and copper film with carbon black (CWCB), on the weldability of PC parts were analyzed, and the effects of CWCB width on weld morphological characteristics, weld seam deformation, residual stress, and welding strength were further studied. The results show that when CWCB is used as laser absorber instead of CB, the number of bubbles within weld seams is significantly reduced and there occurs obvious deformation of CWCB. The depth and area of deformation increase with the increase of CWCB width. When the CWCB width is 2.5 mm, the depth and area of deformation start to decrease, and the overflow height is stable at 386.32~392.26  $\mu\text{m}$ . In addition, the residual stress and weld width increase as the CWCB width increases. The weld parts have the largest strength of 21.5 MPa when the CWCB width is 1.0 mm, and then the welding strength begins to decrease with the increase of CWCB width.

**Key words** laser technique; laser transmission welding; laser absorption layer; welding strength; weld morphology characteristics; residual stress

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 160.5470

## 1 引言

激光焊接技术具有热影响区域小、焊接精度高和

效率高的优点,且易于满足高精度焊接需求,因此在金属<sup>[1-4]</sup>等材料的焊接方面得到了广泛应用。热塑性塑料具有优良的抗疲劳性、高断裂韧性和良好的生物

收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-01-19; 录用日期: 2021-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(52075354)、江苏省高校自然科学基金(18KJA460007)

通信作者: \*cywang@suda.edu.cn

相容性<sup>[5-7]</sup>,被广泛应用于建材、航空航天、汽车零件制造等行业。聚碳酸酯(PC)作为一种强韧的热塑性树脂,因具有强度高、成形收缩率低、耐疲劳性优良、使用温度范围广等优点,在工业生产中被大量应用<sup>[8-9]</sup>。在应用过程中,传统成型工艺难以制备具有复杂特征的零部件<sup>[10]</sup>。通过黏接、机械连接、搅拌摩擦焊接、微波焊接和热板焊接等方式可以实现热塑性塑料在复杂结构工业产品中的应用<sup>[11-12]</sup>。

传统的焊接方法普遍存在安全性低、性能不稳定、连接效率低、工作环境差等缺陷<sup>[13-14]</sup>。在激光透射焊接(LTW)的过程中,在激光光束的作用下,被夹紧的 PC 板材快速完成熔融到固化的相变过程,形成了一个稳定的固体接头<sup>[15]</sup>。该方法具有焊接强度高、热影响区域小、残余应力低、焊接效率高等优势,且无振动、无接触、易于实现自动化<sup>[16]</sup>,已成为最具潜力的连接方法之一,被广泛应用于汽车制造、生物医学等领域。

在应用过程中,为了保证高的光热转化效率,通常在吸收层添加激光吸收剂<sup>[17]</sup>。吸收剂可分为非金属吸收剂和金属吸收剂两类。常见的非金属吸收剂包括染料、Clearweld<sup>[18]</sup>等,其添加过程复杂,稳定性低,成本高。金属吸收剂在特定的激光波长下具有良好的吸收率且其本身具有高的导热系数。Liu 等<sup>[19]</sup>的研究成果表明:以金属铁为吸收剂的聚合物焊接件的焊接接口处清洁、无杂质,且与碳黑(CB)吸收剂相比,高导热金属吸收剂的焊接强度更高、更稳定。颜廷培<sup>[20]</sup>研究了铝粉吸收剂对 PC 可焊性的影响,结果表明,当激光功率为 37 W,焊接速度为

4 mm/s,表面粗糙度为 1.769,吸收剂铝粉的质量分数为 29%时,PC 的最大焊接强度为 12.78 MPa。钟红强<sup>[21]</sup>的研究结果表明,以铝膜为吸收层时,铝膜的接触热阻及热传导有利于减少焊缝接口处的烧蚀和空洞,增加试样间的有效接触面积,进而增大样件的焊接强度。Aden 等<sup>[22]</sup>详细研究了碳黑和铜锡氧化物作为吸收层对激光透射焊接过程的影响,聚丙烯焊接件的拉断测试实验表明,要达到相同的焊接强度,与碳黑相比,铜锡氧化物需要使用更高的激光功率。

金属铜在近红外波段激光的作用下具有相对较低的吸收率和较高的反射率,所以其光热转化效率较低,以金属铜膜为激光吸收层的相关研究鲜有报道。具有高导热系数的铜可以有效避免高斯光束能量分布不均匀导致的焊缝处温度分布不均的问题。因此,为了有效利用铜的高导热性,提高焊缝处的温度均匀性,本文以表面涂敷碳黑的金属铜膜(CWCB)为激光吸收层,进行了 PC 的激光透射焊接研究。

## 2 实验材料及方法

实验中使用的 PC 由美国 GE 公司提供,其热力学参数如表 1 所示。焊接用的试样尺寸为 120 mm×30 mm×2 mm,搭接部位的长度为 40 mm。本文使用的碳黑涂料具有流动性,将碳黑涂料均匀涂抹在铜膜表面上,并在烘干箱中烘干 24 h。使用 T2 铜膜,其铜+银元素的质量分数>99.9%,厚度为 0.02 mm。

表 1 PC 的热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of PC

Parameter	Glass transition temperature /°C	Melting temperature /°C	Thermal decomposition temperature /°C
Value	135-145	220-230	500-550

焊接实验是在半导体激光焊接设备(WFD120)上完成的,设备的基本参数如表 2 所示。

表 2 WFD120 焊接设备的技术参数

Table 2 Technical parameters of laser welding machine WFD120

Parameter	Value
Laser wavelength /nm	980
Maximum laser output power /W	120
Pulse width /ms	0.01-3.00
Pulse frequency /Hz	1-50
Fiber core diameter / $\mu$ m	600

实验中激光光束的焦距为 37 mm,光斑直径为 3 mm,焊接过程中气缸提供稳定的夹紧力,大小为

1 MPa。激光透射焊接示意图如图 1 所示。

焊接后的试样在微机控制的电子万能试验机(型号为 WDW-200E)上完成焊接强度测试。测试过程中十字头的夹紧力为 5 kN,拉伸速度为 5 mm/min,在十字头夹紧处填充垫片,以保证拉伸在同一直线上。焊接完成后将试件放置 3 d,使用丹陌电子科技的 DM-YB1820 动静态应变仪测定样件的残余应力。设备的采样频率为 10 kHz,分辨率为 1  $\mu$  $\epsilon$ ,测量应变范围为  $\pm 19999 \mu\epsilon$ 。在焊缝中心位置粘贴应变片,如图 2 所示,其中  $r$  为应变片中心与小孔圆心的距离, $r_1$  为应变片底边与小孔圆心的距离, $r_2$  为应变片顶端与小孔中心的距离, $d$  为小孔

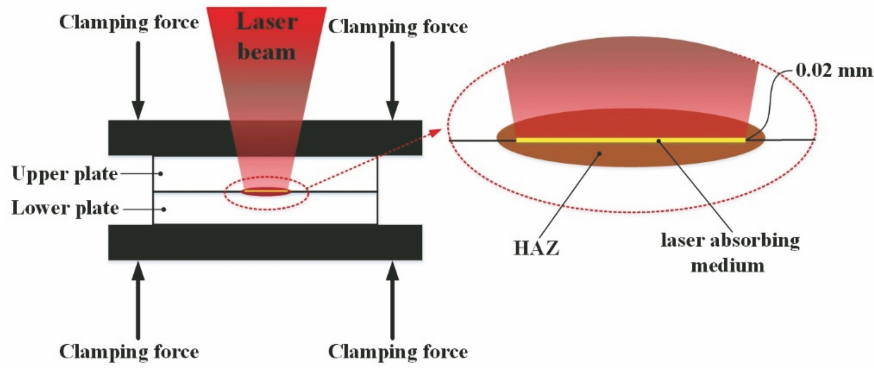


图 1 激光透射焊接示意图

Fig. 1 Schematic of laser transmission welding

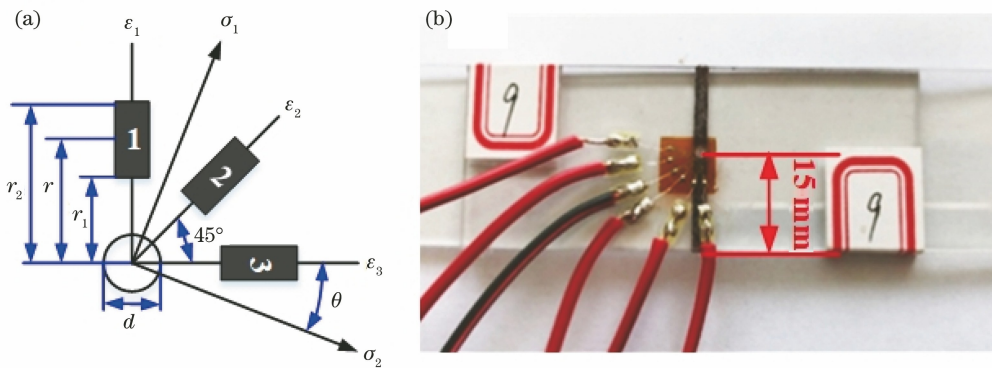


图 2 应变片粘贴。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 2 Strain gage pasting. (a) Schematic; (b) physical image

直径,  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  分别为最大和最小主应力,  $\epsilon_1$  为平行于焊缝方向的应变,  $\epsilon_2$  为与焊缝成  $45^\circ$  角的应变,  $\epsilon_3$  为垂直于焊缝方向的应变。

焊接件裁剪和抛光后(图 3),使用 Carl Zeiss 公司生产的 EVO18 扫描电镜(SEM)观察焊接接口横

断面的接口特征并统计 CWCB 的变形,对焊接件的横断面进行能量色散谱(EDS)分析。使用型号为 XTL-165-VT 的凤凰牌体显微镜对焊缝接口两端的溢出形貌进行分析。

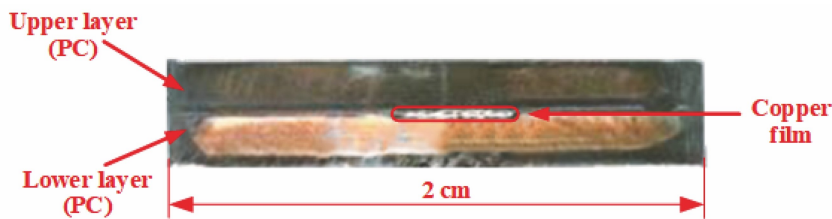


图 3 焊接件横截面抛光后的结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of cross-section of weld part after polishing

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 不同吸收层 PC 板可焊性的对比

分别以 CB 和 CWCB 为吸收层,在不同焊接参数下,焊接件的焊接强度( $S$ )、焊缝宽度( $W_d$ )以及残余应力( $R_s$ )的测试结果如表 3 所示,其中  $P$  为激光功率,  $v$  为焊接速度,  $w$  为吸收层宽度。测试结果表明:在三组焊接工艺参数下,以 CWCB 为吸收层

的焊接件具有更高的焊接强度。焊接件残余应力的测试结果表明:相较于以 CB 为吸收层的焊接件,以 CWCB 为吸收层的焊接件的残余应力的下降幅度( $D$ )为  $13.59\% \sim 19.31\%$ ,而不同吸收剂焊接件的焊缝宽度并无显著差异。说明金属吸收剂的添加有利于增大焊接强度,减小残余应力。这是由于碳黑的导热系数为  $129 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,而铜膜的导热系数为  $407 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,因此焊接过程中以 CWCB 为

表 3 不同吸收层 PC 板的可焊性比较

Table 3 Weldability comparison among PC plates with different absorption layers

No.	$P/W$	$v/(mm \cdot s^{-1})$	$w/mm$	Absorption layer	$S/MPa$	$W_d/mm$	$R_s/MPa$	$D/\%$
1	45	6	2	CWCB	17.25	2.82	5.22	14.29
				CB	15.63	2.86	6.09	
2	45	2	2	CWCB	18.42	3.72	17.49	13.59
				CB	16.53	3.76	20.24	
3	50	4	1.5	CWCB	19.15	2.43	12.33	19.31
				CB	18.20	2.65	15.28	

吸收层时,焊缝处温度分布的均匀性更好。

为了进一步分析 CWCB 和 CB 对焊接效果的影响机制,对焊接件(焊接工艺为  $P=45\text{ W}$ ,  $v=6\text{ mm/s}$ )的横断面放大 40 倍以观察焊缝的形貌差异。图 4(a)为以 CB 为吸收层的焊接件横截面的微观形貌,在放大倍数为 40 时,焊缝的结合面区域存在较为密集、大小不同的气泡,气泡横贯吸收层与透射

层材料。图 4(b)为以 CWCB 为吸收层的焊接件横截面的微观形貌,在放大倍数为 40 时,焊缝的结合面区域存在些许的微小气孔,可以明显看到 CWCB 的变形,最大的变形量为  $57.14\text{ }\mu\text{m}$ 。铜膜具有良好的延展性,在外力作用下易发生变形。焊接过程中,在夹具夹紧力的作用下,熔融的 PC 材料发生热膨胀,产生的作用力作用于铜膜上,进而导致其变形较大。

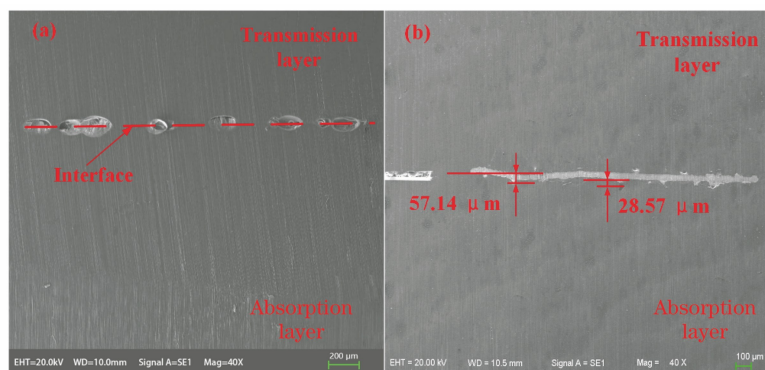


图 4 不同激光吸收层对应的焊接件横截面形貌。(a) CB;(b) CWCB

Fig. 4 Cross-sectional morphologies of weldments for different laser absorption layers. (a) CB; (b) CWCB

在激光功率  $P$  为  $45\text{ W}$ ,焊接速度  $v$  为  $6\text{ mm/s}$  的条件下,以不同宽度的 CWCB 作为激光吸收层进行焊接实验。对焊接件的横断面进行 SEM 分析,实验结果如图 5 所示。可以看出,随着 CWCB 宽度的增加,横截面上气泡的体积和数目先增加后减小,气泡集中在 CWCB 与 PC 接触的交界面上。这些气泡主要是 PC 分解产生的小分子气体在 PC 熔融固化过程中来不及逃逸,残留在焊接件搭接区域内形成的。

### 3.2 焊缝的变形量和溢出形貌分析

统计 SEM 分析样件(焊接工艺为  $P=45\text{ W}$ ,  $v=6\text{ mm/s}$ )横截面上的变形深度和变形面积,结果如图 6 所示,可以看出,当 CWCB 宽度小于  $2.5\text{ mm}$  时,随着 CWCB 宽度的增大,CWCB 的变形深度与面积增大;当 CWCB 宽度大于  $2.5\text{ mm}$  并继续增加时,CWCB 的变形深度与变形面积减小。这是由于

光斑上热量的分布具有高斯特征,远离光斑中心边缘位置的激光能量较弱,因此 CWCB 边缘处激光直接产生的热量相对较少<sup>[23-24]</sup>。在相同的工艺条件下,CWCB 宽度的增加导致焊缝区域整体温度水平下降,PC 的熔融程度下降,所以焊接过程中 PC 对 CWCB 的作用强度降低,CWCB 的变形深度与变形面积减小。

焊缝的形貌特征包含焊缝边缘的溢出形貌,使用光学显微镜观察不同 CWCB 宽度下焊接件焊缝边缘的溢出形貌,并对溢出高度进行测量,结果如图 7 所示。可以看出,在 CWCB 宽度为  $1\text{ mm}$  的情况下,焊缝边缘溢出的 PC 呈现为具有对称特征的蘑菇状;在 CWCB 宽度超过  $1\text{ mm}$  后,溢出的 PC 具有较为规整的弧状边缘。热膨胀产生的作用力使得熔融聚合物的边缘溢出高度( $H$ )基本处于相同水平,CWCB 宽度的增大对焊缝边缘的溢出高度  $H$  影响不大。

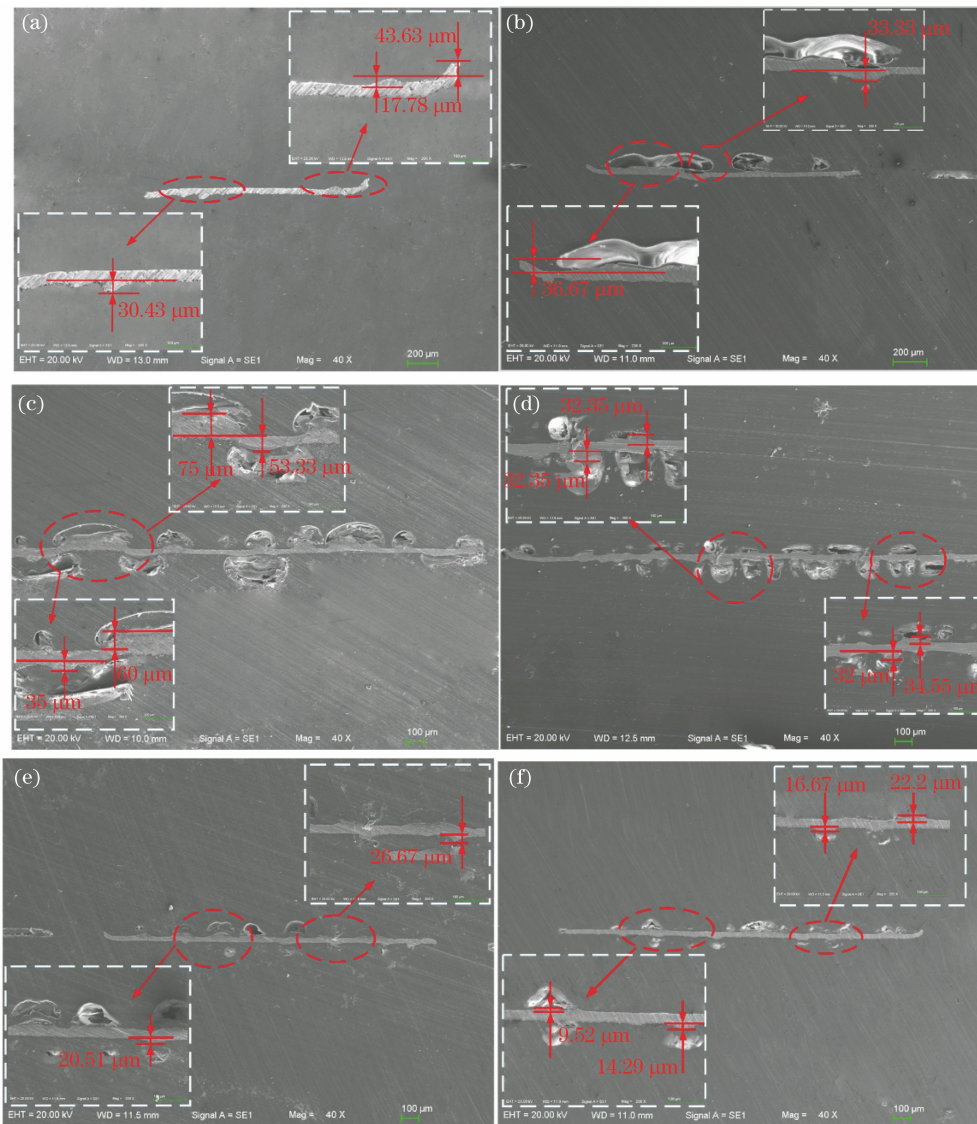


图 5  $P=45\text{ W}$ ,  $v=6\text{ mm/s}$  时不同 CWCB 宽度下焊接件横截面的变形特征。(a)  $w=1.0\text{ mm}$ ; (b)  $w=1.5\text{ mm}$ ;  
(c)  $w=2.0\text{ mm}$ ; (d)  $w=2.5\text{ mm}$ ; (e)  $w=3.0\text{ mm}$ ; (f)  $w=3.5\text{ mm}$

Fig. 5 Deformation features of weldments for different CWCB widths when  $P=45\text{ W}$  and  $v=6\text{ mm/s}$ . (a)  $w=1.0\text{ mm}$ ;  
(b)  $w=1.5\text{ mm}$ ; (c)  $w=2.0\text{ mm}$ ; (d)  $w=2.5\text{ mm}$ ; (e)  $w=3.0\text{ mm}$ ; (f)  $w=3.5\text{ mm}$

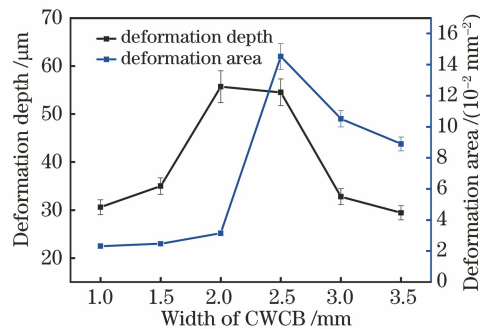


图 6 CWCB 宽度对变形深度和变形面积的影响

Fig. 6 Effects of CWCB width on deformation depth and area

为了更加明显地表征出焊缝中发生变形的主要区域,选用激光焊接工艺为  $P=50\text{ W}$ ,  $v=6\text{ mm/s}$  的焊接件进行 EDS 扫描分析。图 8 展示的是 CWCB 宽度  $w=2\text{ mm}$  时,焊缝接口横截面的 EDS

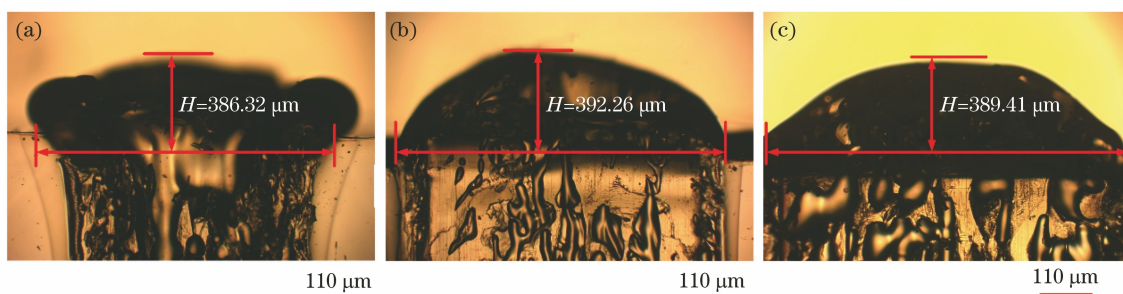


图 7 不同 CWCB 宽度下焊缝边缘溢出形貌。(a)  $w=1$  mm; (b)  $w=2$  mm; (c)  $w=3$  mm

Fig. 7 Overflow morphologies on weld edges for different CWCB widths. (a)  $w=1$  mm; (b)  $w=2$  mm; (c)  $w=3$  mm

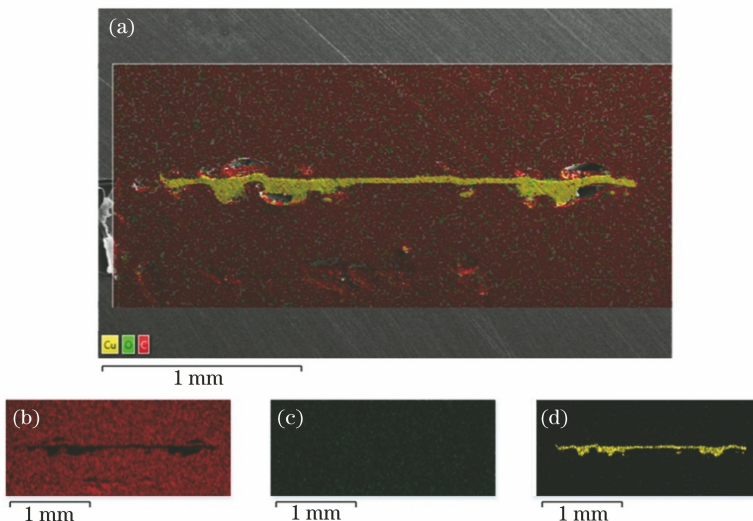


图 8 横截面的 EDS 分析图。(a)元素分布;(b) C 元素的分布;(c) O 元素的分布;(d) Cu 元素的分布

Fig. 8 EDS analysis images of cross section. (a) Elemental distribution; (b) elemental distribution for C; (c) elemental distribution for O; (d) elemental distribution for Cu

扫描结果。由图 8(a)可以看出,焊缝横截面中存在的主要元素为 C、O 和 Cu。图 8(b)、(c)、(d)分别为 C、O、Cu 的元素分布图。可以看出,焊缝变形部分的主要成分为铜元素,由此可见变形的部分为 CWCB。

### 3.3 CWCB 宽度对残余应力和焊接强度的影响

如图 9 所示,焊缝的宽度( $w_1$ )是由吸收层宽度和 PC 之间直接相互作用区域的宽度( $L$ )两部分组成的。与 CB 作为激光吸收层相比,以 CWCB 为激光吸收层时,由于 CWCB 具有更高的导热系数,因此焊缝处的温度分布更均匀,PC 之间直接相互作用区域的宽度更大。

从图 10(a)可以看出,在 CWCB 宽度增加的过程中,焊缝宽度的增加较为平缓,仅在铜膜宽度为 2.0~2.5 mm 时增加稍快。这是由于实验中使用的激光束具有高斯分布特征,光斑直径为 3 mm,吸收层 CWCB 的宽度与光斑直径越接近,焊缝宽度随 CWCB 宽度的变化就越明显。在 CWCB 宽度为

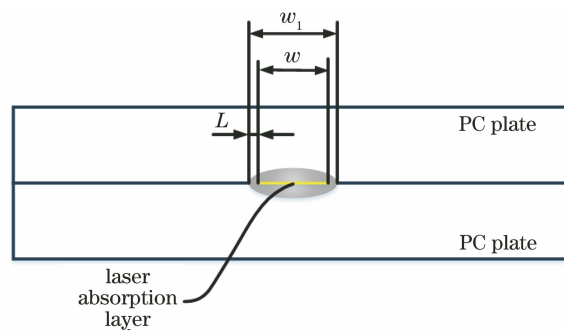


图 9 焊缝组成部分示意图

Fig. 9 Schematic of compositions of weld seam

1 mm 时,焊接件具有最大的焊接强度,之后随着 CWCB 宽度的增加,焊接强度逐渐减小。在铜膜宽度方向上,焊缝处对应的熔融 PC 难以直接接触,不能形成稳定连接,因此焊接件的焊接强度依赖于 PC 之间的直接作用区域。在 CWCB 宽度较小的条件下,高斯光束产生的热量较为集中,焊接件 PC 之间的直接作用区域较宽,因此焊接强度较高。在 CWCB 宽度增加的过程中,铜膜的变形深度和变形面积快速

增加,这导致 PC 之间的不稳定连接点增加。如图 10 (b)所示,焊接件的横向残余应力和纵向残余应力随

着 CWCB 宽度的增加而增大。所以在 CWCB 宽度持续增加的过程中,焊接强度逐渐减小。

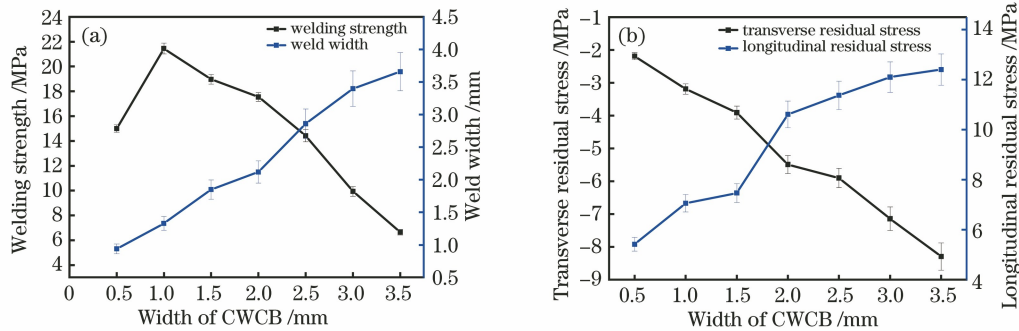


图 10 CWCB 宽度对不同参量的影响。(a)焊接强度和焊缝宽度;(b)残余应力

Fig. 10 Effects of CWCB width on different variables. (a) Welding strength and weld width; (b) residual stress

## 4 结 论

对比了以 CB 和 CWCB 作为激光吸收层时 PC 材料焊接效果的差异,并进一步分析了 CWCB 宽度对焊接件的影响。结果表明: CWCB 可以作为激光吸收层,实现 PC 材料的焊接;由于 CWCB 具有较高的导热率,焊缝处的温度分布较为均匀;以 CWCB 作为激光吸收层可以提高焊接件的焊接强度,减小残余应力。焊缝接口处的主要变形发生在 CWCB 上,由于光斑上热量的分布具有高斯特征,远离光斑中心边缘位置的激光能量较弱,在 CWCB 宽度增加过程中,横截面上的气泡数目和变形程度先增加后减小。焊缝边缘的溢出高度无明显变化,形状由具有对称性的蘑菇状变为不规整的半圆状。在 CWCB 宽度为 1 mm 时,焊接件具有最高的焊接强度,随着 CWCB 宽度的增加,残余应力也在增加,进而导致焊接强度逐渐减小。

## 参 考 文 献

- [1] Li Z X, Wen P, Zhang S, et al. Effects of Nb microalloying on microstructure and mechanical properties of A7204P-T4 aluminum alloy joint by fiber laser-CMT hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0902001.  
栗忠秀, 温鹏, 张松, 等. 铌微合金化对光纤激光-CMT 复合焊接 A7204P-T4 铝合金接头组织和力学性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0902001.
- [2] Zhang S M, Zhang F Q, Zhou D W, et al. Effects of Ni interlayer on microstructure and properties of fusion welded joints of magnesium/aluminum alloys [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0702001.  
张书迈, 张福全, 周惦武, 等. Ni 夹层对镁合金/铝
- [3] Song G, Yu P N, Li T T, et al. Simulation and analysis of magnesium alloy/steel by laser-induced arc hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0602001.  
宋刚, 于培妮, 李涛涛, 等. 镁合金/钢激光诱导电弧复合焊接模拟及分析[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0602001.
- [4] Xia P Y, Li Y, Zhang J, et al. Characteristics of laser transmission welding polyamide-stainless steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0602006.  
夏佩云, 李颖, 张婧, 等. 聚酰胺-不锈钢激光透射焊接工艺特性[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0602006.
- [5] Acherjee B, Kuar A S, Mitra S, 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.
- [6] Amanat N, Chaminade C, Grace J, et al. Transmission laser welding of amorphous and semi-crystalline poly-ether-ether-ketone for applications in the medical device industry[J]. Materials & Design, 2010, 31(10): 4823-4830.
- [7] Amanat N, James N L, McKenzie D R. Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices [J]. Medical Engineering & Physics, 2010, 32(7): 690-699.
- [8] Wei H, Wang C Y. Technics and performance research of laser transmission welding polycarbonate plastics [J]. Chinese Journal of 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.
- [9] Lambiasi F, Paoletti A, Ilio A. Mechanical behaviour of friction stir spot welds of polycarbonate

- sheets [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80 (1/2/3/4): 301-314.
- [10] Li X Y. Study on the laser transmission welding of transparent thermoplastic of PMMA [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011: 25-67.  
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: 25-67.
- [11] Brown N, Kerr D, Jackson M R, et al. Laser welding of thin polymer films to container substrates for aseptic packaging [J]. *Optics & Laser Technology*, 2000, 32(2): 139-146.
- [12] Liu H, Jiang Y, Tan W, et al. Enhancement of the laser transmission weldability between polyethylene and polyoxymethylene by plasma surface treatment [J]. *Materials (Basel)*, 2017, 11(1): 29.
- [13] Wang X, Zhang H Z, Ding G M, et al. Laser transmission welding polypropylene plastics [J]. *Chinese Journal of 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.
- [14] Lei J B, Wang Z, Wang Y S, et al. Experiment study of laser transmission welding of polymethylmethacrylate [J]. *Chinese Journal of 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.
- [15] Hao K D, Liao W, Zhang T D, et al. Interface formation and bonding mechanisms of laser transmission welded composite structure of PET on austenitic steel via beam oscillation [J]. *Composite Structures*, 2020, 235: 111752.
- [16] Chen Z, Zhang W Q, Yan Z J. Plastic laser transmission welding technology and research trends [J]. *Applied Laser*, 2020, 40(3): 556-563.  
陈志, 张婉清, 颜昭君. 塑料激光透射焊接技术的研究动态和发展趋势[J]. *应用激光*, 2020, 40(3): 556-563.
- [17] Xu X F, Parkinson A, Bates P J, et al. Effect of part thickness, glass fiber and crystallinity on light scattering during laser transmission welding of thermoplastics [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 75: 123-131.
- [18] Hartley S, Sallavanti R A. Clearweld laser transmission welding of thermoplastic polymers: light transmission and color considerations [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4830: 63-68.
- [19] Liu M Q, Ouyang D Q, Zhao J Q, et al. Clear plastic transmission laser welding using a metal absorber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 105: 242-248.
- [20] Yan T P. Research on laser transmission welding of polycarbonate based on aluminum powder absorber [D]. Suzhou: Soochow University, 2019: 43-46.  
颜廷培. 基于铝粉吸光剂的聚碳酸酯激光透射焊接研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2019: 43-46.
- [21] Zhong H Q. Research on laser transmission welding of polycarbonate based on aluminum film intermediate layer [D]. Suzhou: Soochow University, 2019: 29-34.  
钟红强. 基于铝膜中间层的聚碳酸酯激光透射焊接研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2019: 29-34.
- [22] Aden M, Mamuschkin V, Olowinsky A. Influence of carbon black and indium tin oxide absorber particles on laser transmission welding [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 69: 87-91.
- [23] Zhong H Q, Wang C Y, Wang C D, et al. Research on laser transmission welding polycarbonate based on aluminum film absorbing layer [J]. *Applied Laser*, 2019, 39(4): 590-595.  
钟红强, 王传洋, 王呈栋, 等. 基于铝膜吸收层的激光透射焊接聚碳酸酯研究[J]. *应用激光*, 2019, 39(4): 590-595.
- [24] Jiang M H, Wang C, Yu X D, et al. Residual stress and process research on laser transmission welding PC/Cu/PC [J]. *Applied Laser*, 2020, 40(4): 657-664.  
姜沐晖, 王超, 于晓东, 等. PC/铜/PC激光透射焊接残余应力与工艺研究[J]. *应用激光*, 2020, 40(4): 657-664.