

激光与光电子学进展

激光焊接透明聚碳酸酯的试验研究

曲兆展, 蔡令波, 王剑磊, 王春*

山东大学光学高等研究中心, 山东 青岛 266237

摘要 为得到不添加额外吸收剂的透明聚碳酸酯(PC)焊接试样,使用波长 1710 nm 和 1910 nm 的激光对 PC 进行了透射焊接研究,通过观察焊缝外观和测试焊缝强度以确定焊接试样的质量。试验结果表明:1710 nm 和 1910 nm 的激光可以得到强度接近、焊接效果较好的 PC 试样;使用 1710 nm 的激光,在功率为 20 W、焊接速度为 6.5 mm/s、离焦量为 -6 mm 时,得到了最大拉断力为 1334.4 N、焊接外观效果较好的 PC 试样,试样的强度达到了 PC 本体的 60.9%。

关键词 激光技术; 透明塑料; 激光焊接; 聚碳酸酯

中图分类号 TG456.7 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212768

Experimental Study of Laser Welding Transparent Polycarbonate

Qu Zhaozhan, Cai Lingbo, Wang Jianlei, Wang Chun*

Center for Optics Research and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, Shandong, China

Abstract To obtain transparent polycarbonate (PC) welding samples without adding additional absorbents, 1710 nm and 1910 nm lasers were used to study the transmission welding of PC. The qualities of obtained welding samples were verified by the corresponding weld appearance and the strength of each sample. The experimental results show that the PC welding samples obtained by 1710 nm laser and 1910 nm laser have close strength and desired welding effect. The maximum tensile force of 1334.4 N was obtained by the 1710 nm laser with parameters as follows: 20 W power, 6.5 mm/s welding speed, and -6 mm defocusing amount, and the strength of the welding sample reached 60.9% of the PC substrate.

Key words laser technology; transparent plastic; laser welding; polycarbonate

1 引言

激光透射焊接具有焊接速度快、自动化程度高、加工应力小等诸多优势^[1],是热塑性塑料连接的一种常见方式。用该方式焊接的塑料制品被广泛应用于汽车零部件制造、医疗、电子及食品包装等领域^[2-4]。

国内关于激光塑料焊接的研究主要集中在焊接参数(激光功率、焊接速度、离焦量、保压时间、光斑大小等)对焊接效果的影响^[5-7]、不同种类吸收剂的制备与探索^[8-10]、焊接过程中的温度场分布、材料形变等方面的仿真模拟^[11-13]及不同算法预测焊接结果^[14-15]等方面。

随着中国经济的蓬勃发展及人民生活水平的提高,在人口老龄化、新冠疫情暴发等问题的推动下,我国对医疗用品的需求不断增加,而医用透明塑料具备的各种优异性能则可以满足医疗行业的多种需求。透明塑料对常见的近红外波段(800~1100 nm)的激光吸

收率较低,使用这些波长的激光器焊接透明塑料需要添加具有一定污染性的吸收剂,此外还会引入额外的成本和复杂的加工工序^[16-17],这无疑限制了激光焊接技术在医疗塑料制品生产方面的应用。

相关研究表明,透明塑料对波长在 1.7~2 μm 的光吸收强烈^[18],此波段的激光可以对透明塑料直接进行焊接。聚碳酸酯(PC)是一种被广泛应用的工程性塑料,具备较好的透光性和很强的抗冲击能力,其焊接制品可应用于需要反复消毒的医疗器械中,如高压注射器、外科手术面罩、血液分离器等医疗器械。医用级聚碳酸酯耐用性强,可经受清洗剂、加热和大剂量辐射消毒且物理性能不会发生改变,因而可应用于人工肾血液透析设备^[19]。可见,研究透明 PC 塑料的焊接工艺对医疗领域有重要的意义。国内关于透明 PC 塑料的无吸收剂焊接研究较少,本文选择使用 1710 nm 和 1910 nm 两种波长的半导体激光器对透明 PC 塑料进

收稿日期: 2021-10-20; 修回日期: 2021-11-15; 录用日期: 2021-12-01; 网络首发日期: 2021-12-15

通信作者: *chunwang@sdu.edu.cn

行了焊接研究,比较了两种波长对 PC 塑料焊接效果的差异,通过调整焊接速度和离焦量等参数观察试样焊缝的变化规律,通过拉力试验测试焊缝的强度,寻找适合本次焊接试验的工艺参数组合。

2 试验原理及方案

2.1 激光焊接原理

图 1 为传统激光透射焊接和激光无吸收剂透射焊接的原理图。透明塑料对近红外波段的光的吸收率 α_1 较小,激光经过两层塑料后只有较少部分被吸收,难以产生足够的热量使焊接完成,因此需要在下层塑料的上表面添加激光吸收剂,其对激光的吸收率 α_2 远大于 α_1 ,激光被吸收剂吸收后释放热量,在附近形成热作用区,两层塑料板材在压力和热膨胀的作用下产生强键合作用从而焊接在一起。透明塑料对 1.7~2 μm 的激光吸收较强,只需将激光束聚焦于两透明塑料的接触面,激光就可以被两层塑料大量吸收,从而无需使用吸收剂。

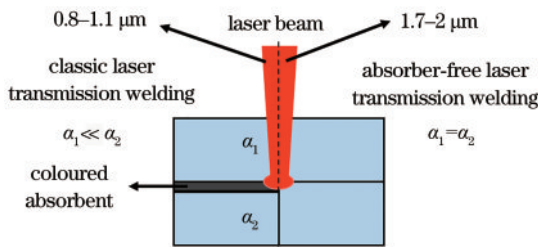


图 1 激光透射焊接原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser transmission welding

2.2 试验材料

图 2 为本次试验所用 PC 塑料板(尺寸为 60 mm × 30 mm × 1.5 mm)的透过率曲线图,从图 2 可以看出,PC 在近红外波段(0.8~1.1 μm)的透过率约为 87%,

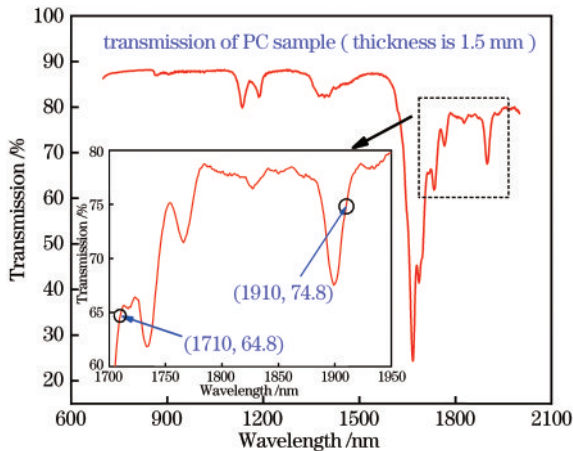


图 2 PC 材料的透过率曲线图(插图:虚线框内透射曲线的放大图)

Fig. 2 Transmittance of the PC material (inset: zoom-in transmission curve in the dotted box)

在 1710 nm 和 1910 nm 处的透过率分别为 64.8% 和 74.8%。根据能量守恒定律有,

$$P = P_a + P_\beta + P_\gamma, \quad (1)$$

式中: P 为激光输出的总功率; P_a 为聚合物吸收的功率; P_β 为材料透过的功率; P_γ 是材料表面反射的功率。通常情况下 PC 塑料板的反光率约为 10%^[20], 因此 PC 塑料对 1.7~2 μm 激光的吸收率明显高于 0.8~1.1 μm 激光, 同时兼具较好的透光率, 这是该波段的光可以直接焊接透明塑料的原因。材料的拉伸强度公式为

$$\sigma = F/A, \quad (2)$$

式中: σ 为材料的拉伸强度(单位为 MPa); F 为材料断裂时所能承受的最大力值(单位为 N); A 为材料断裂时的截面积(单位为 mm^2)。经测试本次试验所用的 PC 塑料板母材的破坏拉伸力为 2528 N, 试样的截面积为样品厚度乘以宽度, 经计算 PC 塑料板的拉伸强度为 56.2 MPa。

2.3 试验装置

图 3 为本次试验的焊接装置图, 激光器输出的激光经光纤耦合传输至焊接头, 焊接头的运动轨迹通过三维移动平台带动, 沿 Z 轴方向调整焊接头使激光聚焦于治具夹紧下的两层塑料的接触面, 沿 Y 轴在长为 30 mm 的线段上进行焊接。

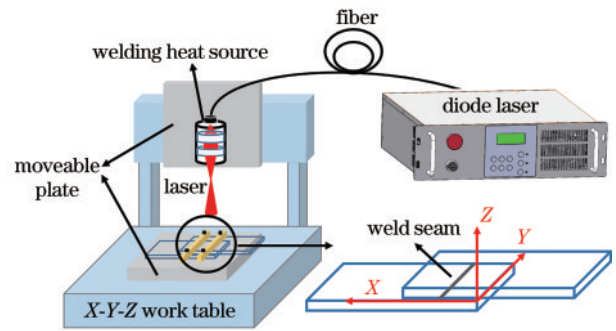


图 3 焊接装置

Fig. 3 Welding device

进行焊接试验前将塑料板材进行超声处理, 减少表面油污, 防止对焊接效果产生影响, 清洗完成后放入干燥箱烘干。焊接完成后使用电子显微镜观察焊缝的微观形貌, 使用电子拉力试验机测试焊接试样的拉断力 F , 寻找最佳的焊接效果。影响焊接质量的主要因素为激光功率 P 、焊接速度 v 和离焦量 s , 试验通过控制变量的方法研究各因素对焊接强度的影响。

3 试验结果与讨论

3.1 1910 nm 和 1710 nm 激光焊接 PC 塑料对比试验

分别使用 1910 nm 和 1710 nm 的半导体激光器对 PC 塑料进行焊接, 试验结果如图 4 所示。

在激光功率保持 20 W 不变的情况下, 当焊接速度分别为 5 mm/s 和 8 mm/s 时, 使用 1910 nm 和

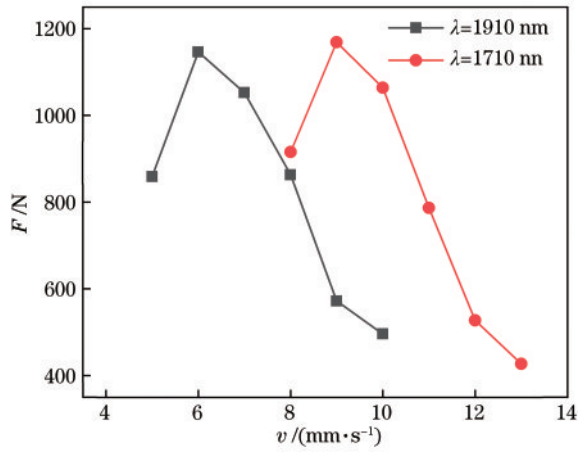


图 4 功率为 20 W 时焊接速度对试样拉断力的影响
Fig. 4 Effect of welding speed on the tensile force of specimen with laser power of 20 W

1710 nm 激光焊接的 PC 试样出现被烧焦的现象。随着速度的增加,两种波长的激光所焊接的 PC 试样的强度均呈现出先增后减的趋势,且拉断力的最大值和变化规律有较好的一致性,这说明两种波长的激光都可以有效地焊接两层透明 PC 塑料。由于 PC 塑料对 1710 nm 激光的吸收更加强烈,在同种焊接效果下使用该波长的激光焊接速度更快,可以更快地达到预期效果从而提高焊接效率,因此下文选择使用 1710 nm 的激光研究各参量对焊接效果的影响。

使用 1710 nm 激光焊接的试样,其焊缝微观形貌如图 5 所示。当焊接速度较低时,激光能量密度较大,焊缝中心的温度达到 PC 的分解温度,材料被严重烧焦;当焊接速度增大时,焊缝局部位置存在激光烧蚀产生的空洞,此时塑料的焊接强度较大。随着速度继续增加,焊缝内部的烧蚀和气泡逐渐消失,焊接的强度逐渐降低。

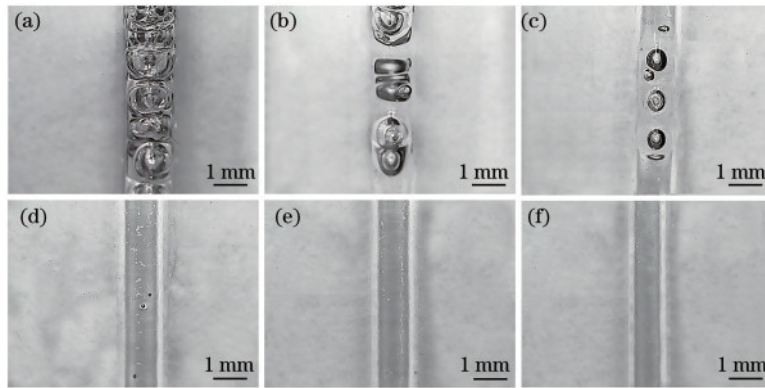


图 5 在不同焊接速度下形成的焊缝的微观图。(a) $v=8$ mm/s; (b) $v=9$ mm/s; (c) $v=10$ mm/s; (d) $v=11$ mm/s; (e) $v=12$ mm/s; (f) $v=13$ mm/s

Fig. 5 Microstructure of welding seam with different welding speeds. (a) $v=8$ mm/s; (b) $v=9$ mm/s; (c) $v=10$ mm/s; (d) $v=11$ mm/s; (e) $v=12$ mm/s; (f) $v=13$ mm/s

3.2 焊接速度和激光功率对焊接效果的影响

图 6 展示了使用 1710 nm 激光焊接的试样,其焊缝宽度与焊接速度之间的变化规律。试验中,激光功率固定在 20 W。随着焊接速度逐渐增加,焊缝宽度持

续变小。在塑料未严重烧焦(焊接速度在 9~13 mm/s)时,焊缝宽度与试样的拉断力成正相关。

现在保持焊接速度 8 mm/s 不变,改变激光功率(6~20 W)进行试验,得到的焊接试样的拉断力如图 7

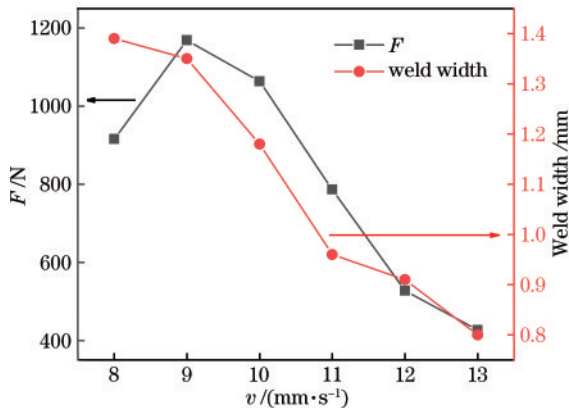


图 6 焊缝宽度和拉断力随焊接速度的变化关系
Fig. 6 Relationship between weld width and tensile force with welding speed

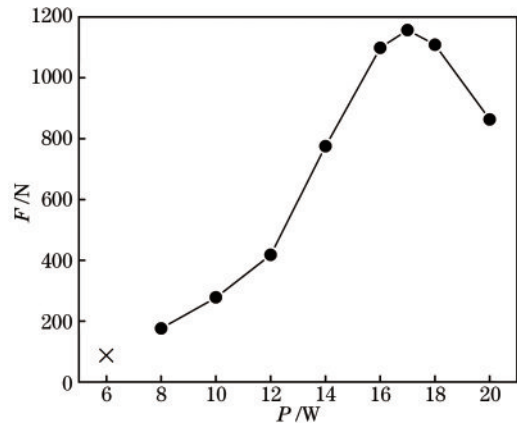


图 7 焊接速度为 8 mm/s 时激光功率对试样拉断力的影响
Fig. 7 Effect of laser power on the tensile force of specimens with welding speed of 8 mm/s

所示。在焊接功率为 6 W 时,激光的能量密度较低,产生的热量不足以使塑料熔化,焊接失败。在激光功率增加至 17 W 之前,试样的拉断力一直增加,最大达到了 1156.8 N。随着激光功率继续增大,PC 塑料被烧焦,试样的拉断力降低。

3.3 离焦量对焊接效果的影响

激光无吸收剂透射焊接同种塑料时,由于两层塑料对激光的吸收率相同,激光能量经过上层塑料后被部分吸收,到达下层材料时强度会有所衰减,上层塑料不可避免地会比下层塑料吸收更多的激光能量。为防止上层塑料吸收过多激光能量而发生烧焦或使下层塑料熔化不充分,导致焊接试样质量下降,可以适当地把离焦量 s 从 0 调整至较小的负值(在本文中,定义激光聚焦于两层塑料的接触面时的离焦量为 0),使得激光

到达上层塑料上表面时的光斑直径 D 变大,从而减小激光的功率密度,减少上层塑料对激光的吸收,如图 8 所示。

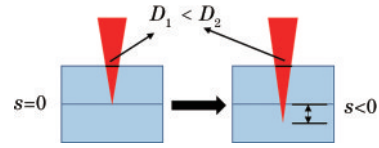


图 8 离焦量的定义

Fig. 8 Definition of the defocusing amount

本文选择离焦量为 -3 mm 和 -6 mm 的试验作为离焦量为 0 mm 的对比试验。改变离焦量得到的焊缝形貌如图 9 所示,图中各组试验的激光功率和焊接速度均分别保持在 20 W 和 8 mm/s。

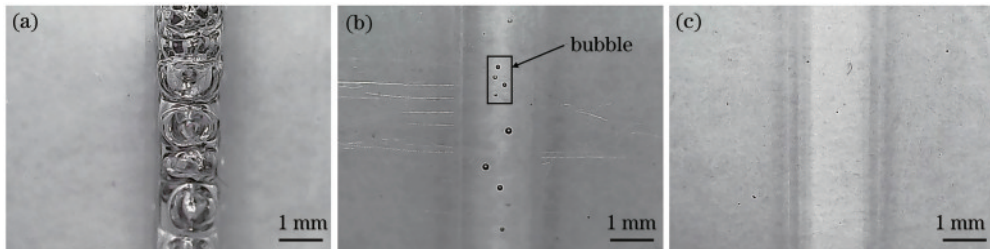


图 9 不同离焦量下的焊接试样。(a) $s = 0$ mm; (b) $s = -3$ mm; (c) $s = -6$ mm

Fig. 9 Welding specimens with different defocusing amounts. (a) $s = 0$ mm; (b) $s = -3$ mm; (c) $s = -6$ mm

从图 9 中可以看出,随着离焦量从 0 开始减小,焊缝宽度逐渐加宽,且上层 PC 塑料没有因吸收过多的激光能量而被烧焦。当离焦量为 -3 mm 时,焊缝中心产生了一些肉眼不可见的气泡;随着离焦量的继续减小,气泡完全消失。三种焊接条件下得到的试样的拉断力分别为 915.6 N、1161 N 和 1013.4 N。保持功率为 20 W,在不同的离焦量下,调整焊接速度观察拉断力的变化趋势,试验结果如图 10 所示。

当离焦量为 -6 mm,焊接速度为 6.5 mm/s 时,PC 塑料未被烧焦,焊缝中存在少量肉眼难以观察到的气泡,此时试样的拉断力达到了最大值 1334.4 N,对应的焊缝宽度约为 1.3 mm,经计算,焊缝的剪切力达到了 34.2 MPa,为 PC 本体的 60.9%。当焊接速度降至 6 mm/s 时,试样被烧焦,焊接强度开始下降。进一步设置离焦量为 -9 mm 进行研究,此时激光焦点距离两层塑料的接触面过远,焊接效果不理想。

3.4 焊缝断口形貌分析

设置激光功率为 20 W,焊接速度为 8 mm/s,离焦量为 0 mm,对应试样焊缝的断口形貌外观如图 11(a) 所示。上层的塑料吸收激光能量过多,导致 PC 本体被严重烧焦,拉力测试时 PC 板材直接断开。保持激光功率和焊接速度不变,设置离焦量为 -3 mm,得到的试样经拉力测试后的外观如图 11(b) 所示。此时,两层 PC 塑料板可以完全分离。通常情况下,焊接试样经拉力测试后从焊缝处断裂意味着实际焊接强度接近基材强度,而两层塑料完整分离意味着焊接强度低于基材强度^[17]。但对于本文来说,焊缝断裂是因为上层塑料吸收了过多的激光能量,PC 塑料板被严重烧焦,导致本身强度下降,而非因为实际焊接强度接近母材原有的强度。此外,上层塑料烧焦还会影响焊接试样的外观。综上所述,使用 1710 nm 激光作为光源时,适当的负离焦量可提高同种 PC 塑料焊接的强度并减轻上层塑料的烧焦程度。

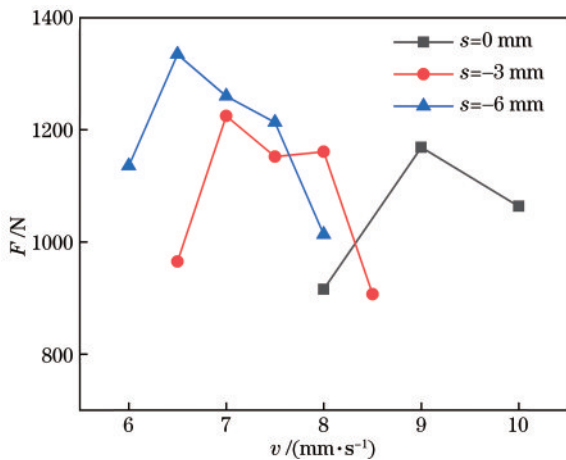


图 10 不同离焦量下试样的拉断力

Fig. 10 Tensile force with different defocusing amounts

当离焦量为 -3 mm、焊接速度为 7 mm/s 时,PC 板材开始出现被烧焦的情况,试样的拉断力为 1224.6 N。

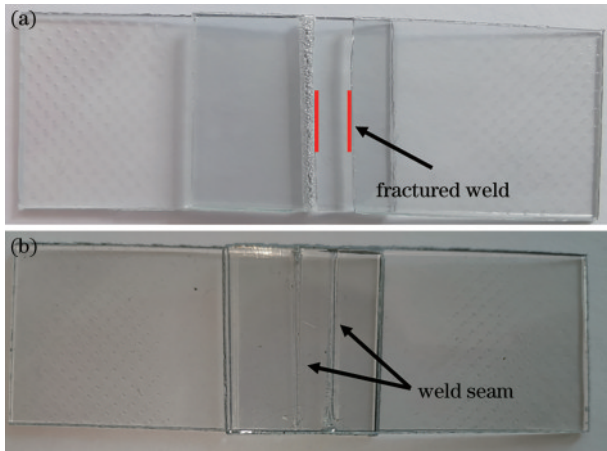


图 11 拉力测试后的焊接试样。(a)焊缝断裂;(b)焊缝分离
Fig. 11 Welding specimens after tensile test. (a) Weld fractured; (b) weld separated

4 结 论

本文使用 1710 nm 和 1910 nm 两种波长的激光器对同种 PC 透明塑料进行了焊接研究,分析了材料的光谱特性,证明所用波长激光的优势和可行性。结果表明,1710 nm 和 1910 nm 两种波长的激光器都可以有效地对 PC 塑料进行焊接。两者的焊接效果差距较小,但 1710 nm 激光焊接的效率更高。

在 PC 材料未被烧焦的情况下:保持焊接速度不变,焊接得到的透明 PC 试样的拉断力随激光功率的增大而增加;保持激光功率不变,试样的拉断力随焊接速度的减小而增加。

适当将离焦量调整为负值可防止上层塑料被烧焦,有效提高焊接试样的强度。基于本文所使用的激光器和试验材料,在激光功率为 20 W、焊接速度为 6.5 mm/s、离焦量为 -6 mm 的情况下,得到了剪切力为 34.2 MPa 的 PC 焊接试样,试样的强度达到了 PC 本体的 60.9%。

参 考 文 献

- [1] Hubeatir K A. Laser transmission welding of PMMA using IR semiconductor laser complemented by the Taguchi method and grey relational analysis[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 20: 466-473.
- [2] 周振. ABS 汽车仪表盘加工工艺对其质量影响[J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(12): 41-45.
Zhou Z. Influence of processing of ABS automobile dashboard on its quality[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(12): 41-45.
- [3] 尚金龙, 李思海, 陈贻明. 纤维增强塑料在航空航天领域中的应用[J]. *塑料工业*, 2019, 47(1): 148-151.
Shang J L, Li S H, Chen Y M. Application of fiber reinforced plastic in aerospace field[J]. *China Plastics Industry*, 2019, 47(1): 148-151.
- [4] Romeo J. Medical plastics thrive in crisis[J]. *Plastics Engineering*, 2021, 77(1): 22-25.
- [5] 李品, 孙跃东, 谭文胜, 等. 红外加热辅助激光透射焊接异种聚合物[J]. *激光技术*, 2019, 43(3): 307-313.
Li P, Sun Y D, Tan W S, et al. Laser transmission welding of heterogeneous polymers assisted by infrared heating[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(3): 307-313.
- [6] 全源, 靳兆文, 徐艳. 激光功率密度对 ABS 塑料焊缝微观结构的影响[J]. *应用激光*, 2021, 41(1): 131-135.
Tong Y, Jin Z W, Xu Y. The influence of laser power density on microcosmic and shear strength of ABS plastic welds[J]. *Applied Laser*, 2021, 41(1): 131-135.
- [7] 王传洋, 沈璇璇. 聚丙烯激光透射焊接工艺及性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(2): 021403.
Wang C Y, Shen X X. Techniques and performance research on laser transmission welding of polypropylene plastics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(2): 021403.
- [8] 于晓东, 姜沐晖, 张功达, 等. 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[J]. *光学学报*, 2021, 41(14): 1414001.
Yu X D, Jiang M H, Zhang G D, et al. Influences of copper film width on polycarbonate welding strength and weld morphological characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14): 1414001.
- [9] 龙庆, 于晓东, 王超, 等. 基于锌粉吸收剂的聚芳砜激光透射焊接温度场分析[J]. *应用激光*, 2021, 41(3): 496-504.
Long Q, Yu X D, Wang C, et al. Temperature field analysis of laser transmission welding of polyarylsulfone based on zinc powder absorber[J]. *Applied Laser*, 2021, 41(3): 496-504.
- [10] 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.
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.
- [11] 刘伟, 刘会霞, 孟冬冬, 等. 激光透射焊接件拉伸过程应力分布和失效行为[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0602003.
Liu W, Liu H X, Meng D D, et al. Stress distribution and failure behavior of laser transmission welding parts during tensile process[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0602003.
- [12] 四库, 陈盛贵, 钟欢欢. 激光透射焊接聚碳酸酯的有限元数值模拟[J]. *激光杂志*, 2015, 36(6): 104-107.
Si K, Chen S G, Zhong H H. Finite element analysis of laser transmission welding of polycarbonate[J]. *Laser Journal*, 2015, 36(6): 104-107.
- [13] 彭进, 许红巧, 王星星, 等. 焊接速度对填充激光焊接熔池动态行为影响的数值模拟[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0302005.
Peng J, Xu H Q, Wang X X, et al. Numerical simulation of influence of welding speed on dynamic behavior of laser welding molten pool with filler metal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0302005.

- [14] 黄嘉沛, 颜廷培, 丁宁, 等. 基于 LibSVM 激光透射焊接聚碳酸酯的工艺参数优化[J]. 焊接, 2021(3): 39-45, 63.
Huang J P, Yan T P, Ding N, et al. Parameters optimization of laser transmission welding polycarbonate based on LibSVM[J]. *Welding & Joining*, 2021(3): 39-45, 63.
- [15] 王霄, 张成, 王凯, 等. 基于遗传算法-响应曲面方法的激光透射焊接聚碳酸酯工艺的多目标优化[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0603003.
Wang X, Zhang C, Wang K, et al. Multi-objective optimization of laser transmission welding of polycarbonate process based on genetic algorithm-response surface methodology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6): 0603003.
- [16] 方涛, 于捷. 透明 FEP 塑料激光焊接工艺研究[J]. 塑料科技, 2019, 47(11): 79-81.
Fang T, Yu J. Study on laser welding technology of transparent FEP plastic[J]. *Plastics Science and Technology*, 2019, 47(11): 79-81.
- [17] Dave F, Ali M M, Sherlock R, et al. Laser transmission welding of semi-crystalline polymers and their composites: a critical review[J]. *Polymers*, 2021, 13(5): 675.
- [18] Mingareev I, Weirauch F, Olowinsky A, et al. Welding of polymers using a 2 μm thulium fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2095-2099.
- [19] 肖刚. 国内聚碳酸酯生产现状及市场应用与发展分析[J]. 山东化工, 2020, 49(15): 69-71, 73.
Xiao G. Production status and application in market with development analysis of polycarbonate in China[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2020, 49(15): 69-71, 73.
- [20] Fuhrberg P, Ahrens A, Schkutow A, et al. 2.0 μm laser transmission welding[J]. *PhotonicsViews*, 2020, 17(2): 64-68.