

透光白色聚丙烯激光透射焊接工艺研究

谭 贇 朱云鹭 王春明

(华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 透光-透光材料的激光透射焊接是塑料激光焊接领域的一大难点,解决此难题的关键之一在于吸收剂的正确选择和使用。采用炭黑、黑色聚丙烯颗粒、黑漆三种不同的吸收剂,对聚丙烯塑料的激光透射焊接工艺进行研究后发现:采用黑漆作为吸收剂时,能获得较美观的焊缝成形和较好的焊接质量。同时讨论了激光功率、焊接速度、材料板厚与黑漆层厚度等工艺参数对焊接质量的影响规律。并发现焊接过程中产生的气孔、热分解孔洞、表面燃烧等焊接缺陷,与原料纯度较低、能量输入过大有关。可通过选择合适的工艺参数、使用氩气保护等措施对这些缺陷进行控制。

关键词 激光技术; 透光塑料; 激光透射焊接; 吸收剂; 工艺参数

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1203003

Research on the Properties of Laser Transmission Welding of Transparent-Transparent Polypropylene

Tan Yun Zhu Yunlu Wang Chunming

(Department of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Transparent-transparent plastic laser transmission welding is one of the toughest difficulties in the field of plastic laser welding. The key to solve this problem is to use the right absorber. The laser welding of transparent-transparent polypropylene technology is studied by using three kinds of absorbers: the carbon, the black polypropylene particles and the black paint. Welds with desirable property are obtained when using black paint as the absorber. The research also investigates the influence of welding parameters (laser power, welding speed, the thickness of sample and thickness of black paint layer) on the welding quality. It turns out that the appearances of welding defects, such as porosities, thermal deformation holes and surface combustions, are related to low purity of raw materials and excessive energy input. These defects can be taken into control by using proper welding parameters and argon gas.

Key words laser technique; transparent-transparent plastic; laser transmission welding; absorber; technological parameters

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.5470

1 引 言

近年来,激光焊接由于能生成精密、牢固和密封的焊缝,树脂降解少,产生的碎屑少,不会产生污染等优点^[1],克服了传统塑料连接方法中的不足,越来越受到人们的重视和青睐。国外已经开始将塑料激光焊接应用于汽车、电子和医疗等行业,如汽车车灯、安全气囊、保险杠、传感器等。日本丰田公司现

已采用多关节机器人组合的半导体激光器进行批量生产 PA6 塑料进气歧管^[2];奔驰公司将激光焊接应用于制造汽车的电子开门器^[3]。

国外关于塑料激光焊接的研究起始较早,研究较多,主要包括对焊接工艺、数值模拟和吸收剂的研究,最早始于 1970 年^[4]。此外,国外在工业实际应用方面也取得了很大的成果,如将激光用于假牙修

收稿日期: 2013-06-12; 收到修改稿日期: 2013-07-14

作者简介: 谭 贇(1988—),女,硕士研究生,主要从事材料成型及激光加工方面的研究。E-mail: tanyunhust@163.com

导师简介: 王春明(1975—),男,博士,副教授,主要从事激光加工及过程检测等方面的研究。

E-mail: cmwang@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

补^[5],焊接小型零件。瑞士的 Leister 公司推出了世界上首个无需夹持装置的三维(3D)塑料制件球形焊接系统——Globo^[7]。国内关于塑料激光焊接的起步较晚,且研究较少,主要集中在工艺研究,产业化研究几乎没有,与国外的技术差距巨大^[6-8]。

塑料激光焊接领域的最大难点是透光-透光材料的激光透射焊接,其关键在于吸收剂的选择和使用,吸收剂的作用主要是吸收能量并转化为热能,使塑料熔化。关于吸收剂的研究,有学者针对炭黑做了详细研究,发现炭黑含量在 0.07%~0.1% 才能完全吸收辐射,炭黑含量直接影响焊缝强度^[9]。此外,英国焊接学会研发了 ClearweldTM(1998 年申请了专利)^[10]吸收剂,它是一种无色透明化学物质,高度吸收红外线辐射。在此之前,由于激光透射焊接

要求吸收元件吸光能力较强,所以吸光元件需要染成深颜色,Clearweld 的发明使得吸收元件可以为任意颜色,甚至是无色透明的。

关于吸收剂的研究,国内外都较少,因此本文尝试采用不同的吸收剂[炭黑、黑色聚丙烯(PP)颗粒、黑漆],对聚丙烯进行激光透射焊接工艺研究。

2 实验材料与与方法

本文采用德国进口的 100 W 半导体激光器,波长为 915 nm,光斑直径为 0.4 mm。选用的材料为 PP 白板,尺寸为 70 mm×35 mm×2 mm,用激光功率计测定其透射率为 42%。聚丙烯的热物理性能参数如表 1 所示。

表 1 PP 的热物理性能参数

Table 1 Parameters of PP's thermal physical properties

| Material | Glass transition temperature / °C | Fusion temperature / °C | Thermal decomposition temperature / °C | Density / (g/cm ³) | Thermal conductivity / (W/m · K) | Specific heat / [J/(kg · °C)] |
|----------|-----------------------------------|-------------------------|--|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| PP | -15 | 150~170 | 336~366 | 0.9 | 0.24 | 1.93 |

塑料激光透射焊接的原理^[11]如图 1 所示。

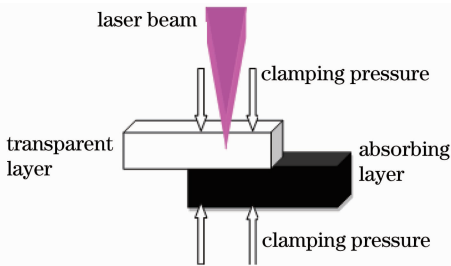


图 1 塑料透射焊接原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of laser transmission welding of plastics

上层选用白色 PP 板作为透射材料,下层白色 PP 板通过在其表面涂上吸收剂作为吸收材料,以达到吸收激光能量、熔化 PP 板、形成焊缝的目的。

焊前用 600 #、800 #、1200 # 砂纸打磨试样加工过程中带来的毛刺,用丙酮去除表面的油渍和污物后,用自主设计的夹具将试样进行机械固定。调节激光器的焦距,使激光束在待焊两 PP 板的接触面位置聚焦。实验过程中调节激光功率、焊接速度等工艺参数研究其对焊接质量的影响规律。

在焊接过程中对焊接接头进行温度检测,本实验搭建的温度检测系统主要包括 E 型热电偶、信号调理仪(K-803B 8 路热电偶调理板,实现信号的放大和滤波)、数据采集卡(实现电压数据的采集)和 Labview 软件编程(实现数据的采集、显示和温度的

转换及读取)4 部分。

热电偶的测温原理如图 2 所示,不同导体 A、B 连接在一起,构成闭合回路,当接点 1、2 的温度不同时,回路中就会产生热电动势,电流表指针会发生偏转,此种现象就是著名的塞贝克热电效应。接点 1 为测量端,通常是焊接在一起的,测量时将它置于被测点。接点 2 为参考端。

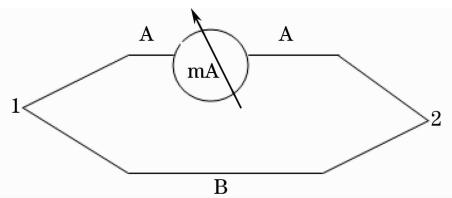


图 2 热电偶测温原理

Fig. 2 Temperature measuring principle of thermocouple

3 结果分析

3.1 采用炭黑作吸收剂

关于炭黑这种吸收剂,已有国外学者进行了较深入的研究,关于炭黑含量、工艺参数对焊接质量的影响本文不再叙述。本实验使用炭黑粉末,将其均匀涂覆压制在 PP 塑料件表面,进行激光透射焊接实验,结果发现在激光功率为 85 W、焊接速度为 1.5 mm/s、光斑直径为 0.4 mm 的工艺窗口下,焊

缝剪切强度能达到 14 MPa, 约为母材抗拉强度 (23.67 MPa) 的 60%。

3.2 采用黑色 PP 颗粒

黑色 PP 呈现黑色是因为在透明 PP 原料中添加了含有炭黑成分的添加剂, 能吸收激光。本实验将黑色 PP 颗粒熔化、涂覆在透明 PP 表面, 结果发现能够实现激光焊接, 但由于实验条件的限制无法保证熔化层的厚度完全一致, 因此未进行详尽的工艺研究实验。但通过摸索实验发现黑色 PP 作为吸收

剂是可行的, 可进行进一步的研究。

3.3 采用黑漆作为吸收剂

通过尝试不同的吸收剂进行塑料激光透射焊接实验, 发现采用黑漆作为吸收剂时能获得较好的焊接质量。

3.3.1 接头形貌

使用体式显微镜在 10 倍放大倍数下观察接头断面形貌, 发现各组参数下的接头形貌都比较均匀, 如图 3 所示, 宏观断口形貌如图 4 所示。

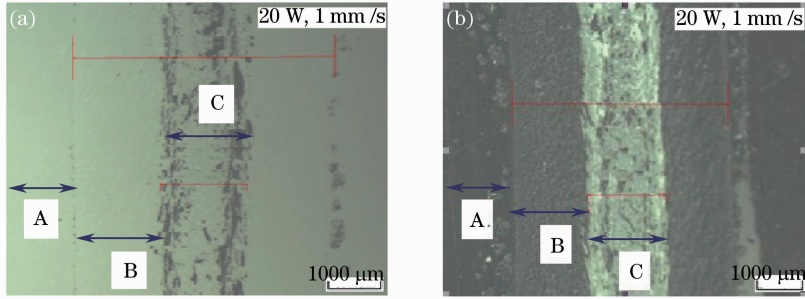


图 3 焊缝形貌图。(a) PP 白板焊接件; (b) 涂有黑漆的 PP 白板焊接

Fig. 3 Appearances of welding seam. (a) Welding seam of transparent PP; (b) welding seam of black painted PP

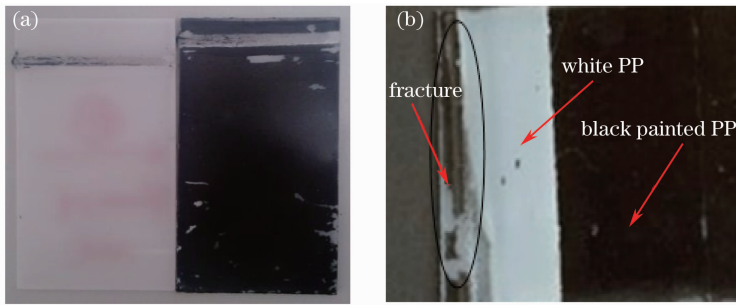


图 4 断口形貌图。(a) 断裂在焊缝处; (b) 断裂在接头处

Fig. 4 Fracture appearances. (a) Fracture at welding seam; (b) fracture at the joint

类似于金属焊缝接头, A 区为母材区, B 区为热影响区, 在焊接过程中受热, C 区为焊缝区, 焊接过程中上下板融合形成焊缝。

3.3.2 激光功率对焊接质量的影响

在光斑大小、夹紧力一定的情况下, 保持焊接速度不变, 改变激光功率, 工艺参数和结果如表 2 所示。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding technological parameter

| No. | Laser power /W | Welding speed / (mm/s) | Welding width /mm | Tension /N | Shear strength /MPa |
|-----|----------------|------------------------|-------------------|------------|-----------------------|
| 1 | 20 | 1 | 1.65 | 288.33 | 4.71 |
| 2 | 30 | 1 | 2.47 | 800 | 9.25 |
| 3 | 40 | 1 | 3.3 | 1156.67 | 10.01 |
| 4 | 50 | 1 | 3.8 | 1031.67 | Fracture at the joint |
| 5 | 70 | 2 | 3.42 | 1158.33 | Fracture at the joint |
| 6 | 70 | 2.5 | 3.08 | 1226.67 | 11.38 |
| 7 | 70 | 3 | 2.99 | 1071.67 | 10.27 |
| 8 | 70 | 4 | 2.98 | 725 | 6.7 |
| 9 | 70 | 5 | 2.84 | 521.67 | 5.25 |

由图5可以看出,当焊接速度保持1 mm/s不变时,激光功率较小时,焊缝宽度较小,拉断力较小,强度低。这是因为,如图6温度检测曲线所示,当功率为20 W、焊接速度为1 mm/s时,焊缝中心最高温度约为180 ℃,达到PP的熔融温度,但熔融时间不到0.4 s,因此PP板熔融焊合的效果较差,焊缝窄(1.65 mm),强度低(4.71 MPa),拉断力小(288 N)。

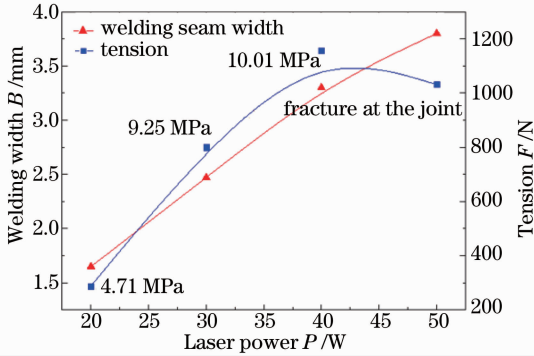


图5 激光功率对焊缝宽度、拉断力的影响

Fig. 5 Effect of laser power on weld width and tensile strength welding width

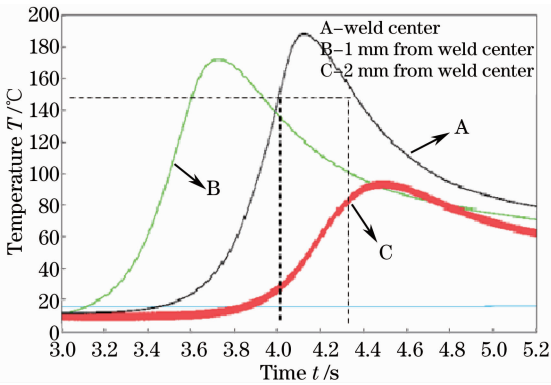


图6 小功率焊接时的温度曲线

Fig. 6 Thermal cycle curves of low laser power

由图5可以看出,随着功率的增加,焊缝宽度增

大,焊缝所能承受的最大拉力增大,剪切强度增大。这是因为,如图7检测曲线所示,当功率为30 W时,焊缝中心最高温度约为300 ℃,熔融时间约为6 s,PP板融合情况较好,焊缝宽度增大(2.47 mm),强度增加(9.25 MPa),拉断力增大(800 N)。

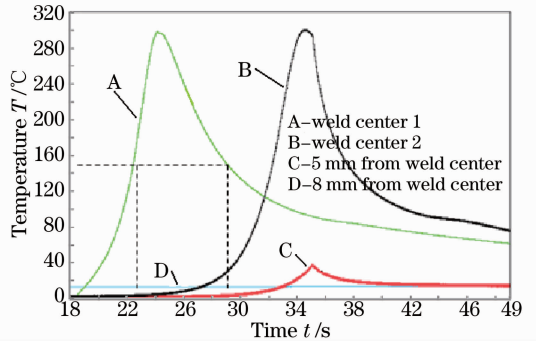


图7 适中功率焊接时温度曲线

Fig. 7 Thermal cycle curves of suitable laser power

从图5可以看出,当激光功率增大到一定程度时,焊缝所承受的最大拉力反而开始下降。这是因为,如图8曲线所示,当功率为50 W时,焊缝中心最高温度超过400 ℃,达到PP的热分解温度(336 ℃~366 ℃),PP板发生热分解,拉伸时发生应力集中。其接头断面形貌和表面形貌如图9所示。

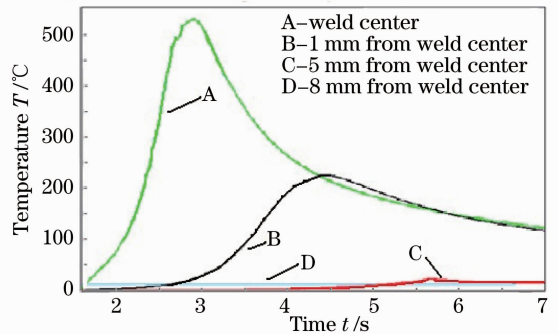


图8 大功率时温度曲线

Fig. 8 Thermal cycle curves of high laser power

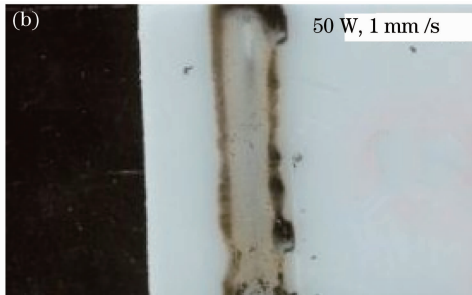
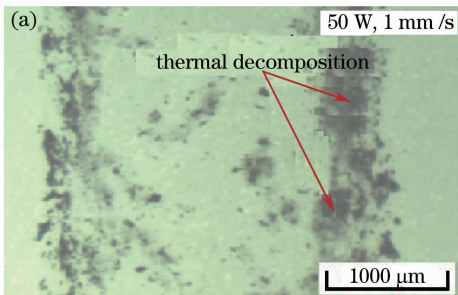


图9 大功率焊接时的(a)接头断面形貌图;(b)焊缝外观形貌图

Fig. 9 (a) Cross section appearance of fracture and (b) surface appearance of the joint under high laser power

3.3.3 焊接速度对焊接质量的影响

在光斑大小、夹紧力一定的情况下,保持激光功

率为70 W不变,改变焊接速度,其对焊缝宽度和拉断力的影响规律如图10所示。

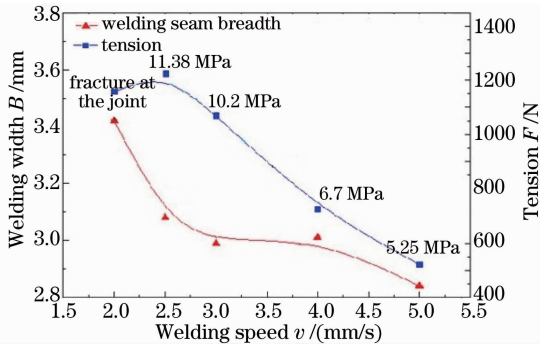


图 10 焊接速度对焊缝宽度和拉断力的影响

Fig. 10 Effect of welding speed on welding width and tensile strength

由图 10 可以看出,随着焊接速度的增大,焊缝宽度呈现下降的趋势,这是因为激光功率不变的条

表 3 不同厚度 PP 在不同参数下的焊接质量

Table 3 Welding properties of different thicknesses of PP with different parameters

| 2 mm PP | | | 3 mm PP | | | 4 mm PP | | |
|----------------|------------------------|----------------------|---------------|------------------------|----------------------|---------------|------------------------|----------------------|
| Laser power /W | Welding speed / (mm/s) | Shear strength / MPa | Laser power/W | Welding speed / (mm/s) | Shear strength / MPa | Laser power/W | Welding speed / (mm/s) | Shear strength / MPa |
| 50 | 2 | 10.21 | 50 | 1.5 | 4.08 | 50 | 0.5 | 4.39 |
| 60 | 2 | 10.19 | 60 | 2 | 3.4 | 60 | 2 | unwelded |
| 60 | 3 | 6.63 | 50 | 1 | 8.11 | 50 | 1 | unwelded |
| 70 | 2.5 | 11.38 | 70 | 1 | 4.21 | 60 | 0.5 | 4.6 |
| 70 | 3 | 10.27 | 80 | 3 | 1.53 | 70 | 0.5 | 5.79 |
| 80 | 4 | 9.29 | 80 | 2.5 | 7.11 | 80 | 1 | 2.44 |
| 95 | 5 | 6.63 | 95 | 3 | 3.12 | 80 | 0.6 | 5.87 |

由表 3 可以看出,当采用相同的工艺参数时,越厚的 PP 焊件剪切强度越低。如激光功率为 60 W、焊接速度为 2 mm/s 时,2 mm 厚 PP 焊件剪切强度为 10.19 MPa;3 mm 厚 PP 焊件剪切强度为 3.4 MPa;而 4 mm 厚 PP 焊件在此工艺参数下则焊不上。当功率相同时,越厚的材料需采用越低的焊接速度,以增大能量输入,才能获得较好的融合效果。如激光功率为 80 W 时,2 mm 材料使用 4 mm/s 的焊接速度,强度达到 9.28 MPa;3 mm 材料使用 2.5 mm/s 的焊接速

表 4 不同黑漆层厚度实验结果

Table 4 Experimental results of different thicknesses of black paints

| Thickness of black paint | Laser power /W | Welding speed / (mm/s) | Welding width /mm | Tension /N | Shear strength /MPa |
|--------------------------|----------------|------------------------|-------------------|------------|---------------------|
| Monolayer | 50 | 1 | 2.76 | 783.33 | 8.11 |
| | 50 | 1.5 | 1.67 | 238.33 | 4.08 |
| | 95 | 3 | 1.86 | 203.33 | 3.12 |
| Double-layer | 50 | 1 | 3.2 | 1048.3 | 9.36 |
| | 50 | 2.5 | 2.31 | 305.0 | 3.77 |
| | 95 | 5 | 2.93 | 676.7 | 6.6 |

由表 4 可知,当工艺参数一致时,双层漆的焊接

件下,增大焊接速度,能量输入减小,焊缝宽度减小。而拉断力呈现先增大后减小的趋势。这是因为当焊接速度过小时,能量输入过大,导致 PP 板发生热分解拉伸时产生应力集中,拉断力较小;随着焊接速度的增大,能量输入过小,使得 PP 熔融焊合的效果差,焊缝宽度窄,拉断力小。

3.3.4 材料厚度对焊接质量的影响

材料厚度越大,它对激光的透射率越低,在相同的工艺条件下,下层吸收材料所吸收的能量就越少,所以熔化和焊合的效果就越差,焊缝宽度就越窄,剪切强度就越低。进行 2、3、4 mm 板厚的激光焊接对比实验,其对 915 nm 半导体激光的透射率分别为 42%、33%、23%,焊接质量结果如表 3 所示。

度,强度达到 7.11 MPa;4 mm 材料使用 1 mm/s 的焊接速度,强度为 2.44 MPa。

3.3.5 黑漆层厚度对焊接质量的影响

在本实验中,若黑漆层太薄,则吸收的能量太少,上下 PP 板融合较差;若黑漆层太厚,会导致表面温度高而内部受热很少,PP 板之间融合效果也不会很好。分别对 PP 表面喷涂单层和双层黑漆进行对比实验,实验结果如表 4 所示。

效果优于单层漆的焊接效果。如激光功率为 50 W、

焊接速度为 1 mm/s 时,单层黑漆的焊件焊缝宽度为 2.76 mm,能承受的最大拉力为 783.33 N,剪切强度为 8.11 MPa;双层黑漆的焊件焊缝宽度为 3.2 mm,能承受的最大拉力为 1048.3 N,剪切强度为 9.36 MPa。当激光功率一致,焊接速度不同时,双层漆的焊接效果也优于单层漆的焊接效果。如单层黑漆激光功率为 95 W、焊接速度为 3 mm/s,即线能量为 31.67 J/mm 时,焊件焊缝宽度为 1.86 mm,能承受的最大拉力为 203.33 N,剪切强度为 3.12 MPa;双层黑漆激光功率为 95 W、焊接速度为 5 mm/s,即线能量为 19 J/mm 时,焊件焊缝宽度为

2.93 mm,能承受的最大拉力为 676.7 N,剪切强度为 6.6 MPa;双层漆焊件的线能量(19 J/mm)小于单层漆焊件的线能量(31.67 J/mm),但是焊缝宽度、能承受的最大拉力和剪切强度都大于单层漆焊件。

对单层、双层漆试样分别进行功率为 20 W、焊接速度为 1 mm/s 的工艺实验,并对焊缝区进行温度检测,结果如图 11 所示。由图可以看出,单层漆焊缝中心最高温度约 180 °C,熔融时间约 0.4 s;双层漆缝中心最高温度约 210 °C,熔融时间约 0.5 s。因此双层漆比单层漆的焊接效果稍好。

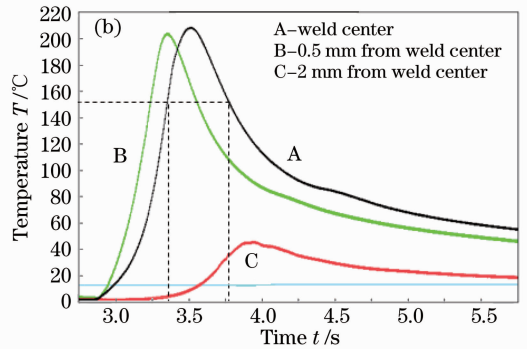
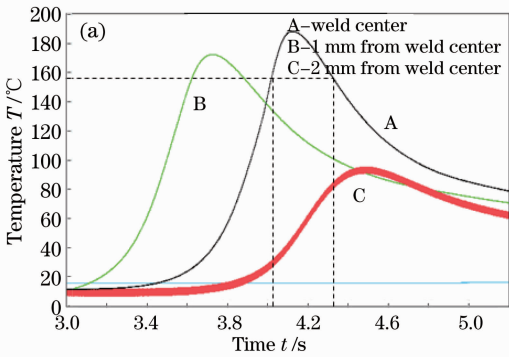


图 11 不同厚度黑漆的温度曲线。(a) 单层漆; (b) 双层漆

Fig. 11 Thermal cycle curves of different thicknesses of black paints. (a) Monolayer; (b) double-layer

3.3.6 缺陷分析与控制

塑料激光焊接产生的缺陷较少,主要包括气孔、热分解和表面形貌差等缺陷。本实验中,2 mm PP 焊接中产生热分解和表面燃烧的缺陷,3 mm PP 焊接中产生气孔和表面灼烧的缺陷,4 mm PP 焊接中产生气孔和表面形貌坑洼不平的缺陷,分别如图 12~14 所示。

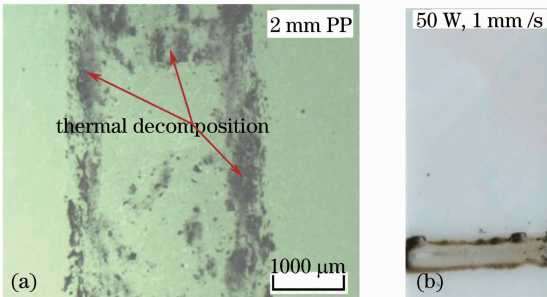


图 12 PP 薄板的典型焊接缺陷。(a) 热分解孔洞; (b) 表面不平、燃烧

Fig. 12 Typical welding defects of thin samples. (a) Thermal decomposition holes; (b) rough surface and combustion

1) 热分解孔洞[图 12(a)]

能量输入太大,温度过高,达到甚至远远超过 PP

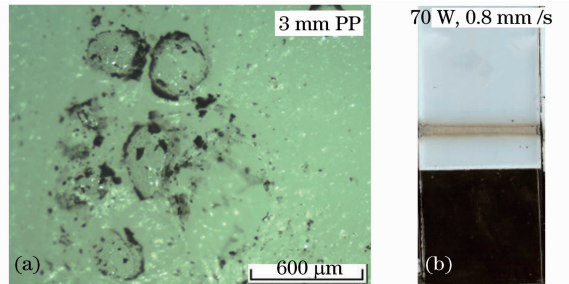


图 13 中厚板的典型焊接缺陷。(a) 气孔;(b) 表面灼烧
Fig. 13 Typical welding defects of middle thickness samples. (a) Porosities; (b) scorch on surface

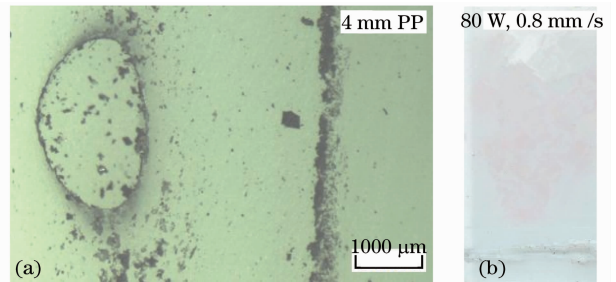


图 14 厚板的典型焊接缺陷。(a) 气孔;(b) 表面坑洼不平
Fig. 14 Typical welding defects of thick samples. (a) Porosities; (b) rough surface

的热分解温度,PP板发生热分解,从而产生孔洞。

2) 表面燃烧、灼烧[见图 13(b)、14(b)]

在同一工艺参数条件下,进行焊接实验,其宏观形貌如图 15 所示。两种不同生产厂家的白色 PP 板对激光的透射率相差不到 1%,因此认为原因可能是

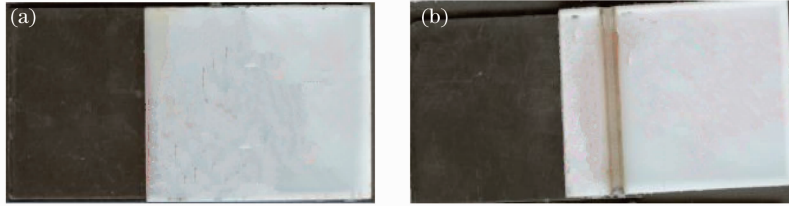


图 15 不同生产厂家的 PP 板焊后外观形貌。(a) 材料 1; (b) 材料 2

Fig. 15 Appearance of welded PP samples produced by different manufactures. (a) Material 1; (b) material 2

3) 表面坑洼不平[图 14(b)]

产生表面坑洼不平的根本原因是由聚合物的热物理性质决定的。聚合物的流动是粘性态流动,所以塑料熔化以后形成粘性流体,而并非像水一样的液体,且流动性较差,冷却后就会导致表面不平。此外,若材料透射率较低、能量输入又较大,那么表面将吸收较多的能量,从而引起表面熔化、流动,也会导致表面不平。

4) 气孔[图 13(a)、14(a)]

由于表面粗糙度的存在,试样在搭接的装夹过程中,上下两板的接触面将会产生间隙,从而夹杂有空气。在激光扫描试样表面时,由于局部受热并且速度较快,致使空气来不及溢出,从而形成气孔。

控制缺陷的措施主要可以采用:1) 当可以选择材料种类或者厚度的时候,选择透射率较高的材料;2) 在 PP 原料上选择纯度比较高且杂质较少的;3) 使用氮气或者氩气等保护气防止燃烧;4) 选择合适的工艺参数范围,能量输入不要过大,防止 PP 板产生热分解;5) 将试样表面打磨平滑,装夹试样时,尽量减小间隙。

4 结 论

1) 采用黑漆作为吸收剂焊接 2 mm 透光 PP 塑料能获得较好的焊缝成形和焊接质量。形成的焊缝形貌较均匀,拉伸时部分焊件断裂在焊缝接头处强度较高,当激光功率为 70 W,焊接速度为 2.5 mm/s,光斑直径为 0.4 mm 时,剪切强度达到 11.38 MPa,约为母材抗拉强度的 50%。

2) 工艺参数如激光功率、焊接速度、黑漆层厚度和材料厚度对焊接质量有较大影响。随着激光功率的增加或者焊接速度的降低,线能量增大,焊缝宽

不同生产厂家的 PP 板,其中含有的杂质种类或含量有差异,可能材料 2 中含有的杂质更容易燃烧。通过后续实验,发现使用氮气或者氩气作为保护气体时,可以控制表面不燃烧,表面形貌将得到改善。

度增大,剪切强度增大,但当功率过大或者焊接速度过低时,线能量过大,温度过高,会引起 PP 的热分解,产生热分解孔洞,拉伸时发生应力集中,强度降低。PP 材料越厚,其对激光的透射率越低,同一工艺条件下,透过的能量越少,因此焊接效果越差。

3) 焊接过程中产生表面燃烧、气孔、热分解孔洞缺陷,可通过采用氩气保护,选用纯度较高的 PP 原料,选择合适的工艺参数加以控制。

参 考 文 献

- 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.
- Wang Yuying. Applications of semiconductor lasers in welding plastic parts for cars[J]. OME Information, 2006, (1): 27-30.
王玉英. 半导体激光器在焊接汽车塑料零件中的应用[J]. 光机电信息, 2006, (1): 27-30.
- Zhang Shengyu. Laser welding of plastic[J]. Laser & Infrared, 2000, 30(3): 169-170.
张胜玉. 塑料激光焊接[J]. 激光与红外, 2000, 30(3): 169-170.
- I Jones. Laser welding for plastic components[J]. Assembly Automation, 2002, 22(2): 129-135.
- D A Grewell. Modeling of molecular healing for micro-laser welding of plastics with diffractive optical elements as spatial modulators[D]. Ohio: The Ohio State University, 2005. 98-99.
- Xie Long, Liu Liming. Laser welding technology and properties of macromolecule material plastics[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(5): 97-100.
谢 龙, 刘黎明. 高分子材料塑料的激光焊接工艺及性能[J]. 焊接学报, 2007, 28(5): 97-100.
- Liu Huixia. Temperature field simulation on laser transmission welding of polyvinylchloride[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1801-1807.
刘会霞. 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.
- Zhang Cheng, Wang Xiao, Wang Kai, et al.. Optimization of weld strength for laser transmission welding of thermoplastic based on response surface methodology and genetic algorithm-

- artificial neural network[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1103006.
- 张 成, 王 霄, 王 凯, 等. 基于响应曲面和遗传算法-人工神经网络的热塑性塑料激光透射连接强度的优化[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 110-116.
- 9 R M Harris. Corloring Technology for Plastics[M]. Norwich: Plastics Design Library, 1999. 277.
- 10 S Hartley, R A Sallavanti. Clearweld laser transmission welding of thermoplastic polymers: light transmission and color considerations[C]. SPIE, 2003, 4830: 63-68.
- 11 Wei Hong. Optimization Study of Laser Transmission Welding Process Parameters for Thermoplastic based on Simulation[D]. Suzhou: Soochow University, 2012. 17-56.
- 韦 宏. 基于模拟的聚合物激光透射焊接工艺参数优化研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012. 17-56.

栏目编辑: 宋梅梅