

文章编号: 0258-7025(2008)03-0466-06

聚丙烯塑料激光透射焊接工艺

王 霄 张惠中 丁国民 季进清 刘会霞

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 利用正交实验方法,研究了聚丙烯(PP)塑料的激光透射焊接工艺参数对焊接质量的影响。对焊接样品进行拉伸测试和切片实验,分析了各焊接因素对拉伸强度和焊缝宽度的影响。结果表明,各焊接因素对焊接强度的影响大小顺序为:焊接速度→激光器的频率→焊接后冷却时间→夹具的夹紧力→光斑直径→激光器功率,并发现激光能量密度过高会导致样品表面焦化形成黑色焊缝,焊缝不均匀则产生伪断裂现象。并用极差法确定了聚丙烯的最佳焊接工艺参数。

关键词 激光技术;透射焊接;工艺参数;聚丙烯塑料

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A

Laser Transmission Welding Polypropylene Plastics

Wang Xiao Zhang Huizhong Ding Guomin Ji Jinqing Liu Huixia

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

Abstract The influence of laser transmission welding parameters for polypropylene (PP) plastics on welding quality is investigated by orthogonal design method. Tensile and section tests are conducted for experimental samples, and the influence of welding factors on tensile strength and welding seam size is analyzed, which indicates subsequence of the influence of welding parameters on PP plastics is welding velocity→laser frequency→cooling time→fixture pressure→beam diameter on the material→laser power. And high laser power density can cause resulting from coking on samples' faces black welding line and fake fracture appears when welding seam is not even. The optimized welding parameters are determined by using range method.

Key words laser technique; transmission welding; technique parameters; polypropylene plastics

1 引 言

随着塑料在电气工业、建筑、航空航天、汽车、医学、工业设备等行业的广泛应用,对复杂塑料件的连接成为影响塑料件质量的重要因素。传统的热塑性塑料连接方法主要有外部加热焊接(如电炉焊接、热板焊接、热气挤压焊接、高频焊接、电阻注入焊接、感应焊接等)、外加部件胶结连接、注入焊接等^[1]。这些传统的方法有很多不足,如外部加热焊接,塑料件容易和加热源粘接在一起且会造成空气污染;注入焊接需要加入导电材料;特别是胶粘固定方法,需经过表面打毛、涂胶、粘接、固化、电烙铁烫平、修整等工序,全部采用手工操作,劳动强度大,工序多,生产效率低,质量难以保证,而且胶粘剂的挥发成分污染环境,影响操作人员身体健康;采用螺钉、卡环等机

械连接,则强度和连接表面质量不易达到要求^[2]。而激光透射焊接是一种新兴的焊接技术,相比于传统的连接方法有许多优点^[3~6]。国外在激光透射焊接领域的工艺研究、产业化、专利都较多^[7~10],而国内在这方面的研究较少,处于起步阶段^[11,12]。

本文主要研究塑料的激光透射焊接实验及各种焊接因素对焊接质量的影响。实验材料是聚丙烯(PP),厚度为2 mm,采用含有碳黑的黑漆作为焊接吸收剂,利用剪切强度作为焊接实验好坏的衡量标准。

2 激光透射焊接原理

激光透射焊接又名近红外透射焊接,其原理是红外激光束(波长一般在 800~1060 nm)通过反射

收稿日期:2007-05-21;收到修改稿日期:2007-10-19

作者简介:王 霄(1964—),男,陕西人,副教授,主要从事激光加工及性能数值模拟,CAD/CAE/CAM,虚拟样机技术等方面的研究。E-mail: wx@ujs.edu.cn

镜、透镜或光纤组成的光路系统,将激光器所产生的能量聚焦在待焊接区域。两个待焊接件必须有一个对激光束是透明的,即激光光束可以穿透它却损失很少的能量,另外一个是不透明的,即吸收激光辐射的能量。辐射穿透两个待焊接部件中的透明的焊接件,另外不透明的那个部件在接触面上吸收激光辐射形成热作用区。热作用区中的塑料被融化,在随后的凝固过程中,已融化的材料形成接头,待焊接的部件即被连接起来,如图 1 所示。

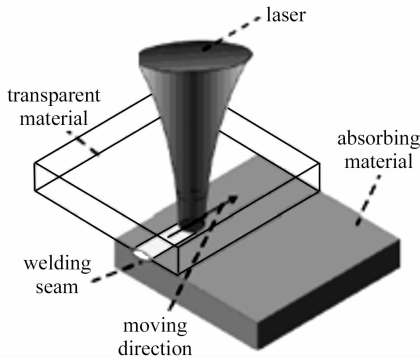


图 1 激光透射焊接原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser transmission welding of plastics

3 实验设备及方案

3.1 实验设备

实验所用激光器为 LD802M 型 Nd:YAG 激光器,其主要的技术参数为:波长 1064 nm;最大单脉冲输出能量 60 J;最大平均输出功率 200 W;最高重复频率 100 Hz;最大发散角 10 mrad;脉冲宽度最小 0.3 ms,最大 20 ms;功率不稳定性小于 ±5%。

3.2 实验方案

实验共有六个影响因素,分别为激光器平均功率、光斑直径、焊接速度、夹具的夹紧力、激光器的频率、焊接后冷却时间,每个因素有 5 个水平。如果将所有可能的实验做完,那将做 $5^6 = 15625$ 次实验,这显然是不可能的,所以使用正交实验来设计实验,实验影响因素及其水平参数如表 1 所示。

经正交实验设计,所得实验结果如表 2 所示。

4 实验结果及分析

经拉伸测试和切片实验,测得样品的拉力和焊缝宽度,并计算了样品的剪切强度,具体数值如表 3 所示。

表 1 实验影响因素与水平参数

Table 1 Experimental factors and levels

| Sequence number element | A Average power /W | B Beam diameter /mm | C Welding velocity / (mm/s) | D Laser frequency /Hz | E Fixture pressure /MPa | F Cooling time /s |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|
| Level 1 | 50 | 2 | 1.5 | 6 | 0.0065 | 5 |
| Level 2 | 60 | 3 | 2.5 | 8 | 0.037 | 10 |
| Level 3 | 70 | 4 | 3.5 | 10 | 0.067 | 15 |
| Level 4 | 80 | 5 | 4.5 | 12 | 0.1 | 20 |
| Level 5 | 90 | 6 | 5.5 | 15 | 0.15 | 30 |

表 2 焊接参数表

Table 2 Welding parameters

| Sequence number element | A Average power /W | B Beam diameter /mm | C Welding velocity / (mm/s) | D Laser frequency /Hz | E Fixture pressure /MPa | F Cooling time /s |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|
| No. 1 | 50 | 2 | 1.5 | 6 | 0.0065 | 5 |
| No. 2 | 50 | 3 | 2.5 | 8 | 0.037 | 10 |
| No. 3 | 50 | 4 | 3.5 | 10 | 0.067 | 15 |
| No. 4 | 50 | 5 | 4.5 | 12 | 0.1 | 20 |
| No. 5 | 50 | 6 | 5.5 | 15 | 0.15 | 30 |
| No. 6 | 60 | 2 | 2.5 | 10 | 0.1 | 30 |
| No. 7 | 60 | 3 | 3.5 | 12 | 0.15 | 5 |
| No. 8 | 60 | 4 | 4.5 | 15 | 0.0065 | 10 |
| No. 9 | 60 | 5 | 5.5 | 6 | 0.037 | 15 |
| No. 10 | 60 | 6 | 1.5 | 8 | 0.067 | 20 |

(续表)

| Sequence number element | A Average power /W | B Beam diameter /mm | C Welding velocity /(mm/s) | D Laser frequency /Hz | E Fixture pressure /MPa | F Cooling time /s |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| No. 11 | 70 | 2 | 3.5 | 15 | 0.037 | 20 |
| No. 12 | 70 | 3 | 4.5 | 6 | 0.067 | 30 |
| No. 13 | 70 | 4 | 5.5 | 8 | 0.1 | 5 |
| No. 14 | 70 | 5 | 1.5 | 10 | 0.15 | 10 |
| No. 15 | 70 | 6 | 2.5 | 12 | 0.0065 | 15 |
| No. 16 | 80 | 2 | 4.5 | 8 | 0.15 | 15 |
| No. 17 | 80 | 3 | 5.5 | 10 | 0.0065 | 20 |
| No. 18 | 80 | 4 | 1.5 | 12 | 0.037 | 30 |
| No. 19 | 80 | 5 | 2.5 | 15 | 0.067 | 5 |
| No. 20 | 80 | 6 | 3.5 | 6 | 0.1 | 15 |
| No. 21 | 90 | 2 | 5.5 | 12 | 0.0065 | 10 |
| No. 22 | 90 | 3 | 1.5 | 15 | 0.1 | 15 |
| No. 23 | 90 | 4 | 2.5 | 6 | 0.15 | 20 |
| No. 24 | 90 | 5 | 3.5 | 8 | 0.0065 | 30 |
| No. 25 | 90 | 6 | 4.5 | 10 | 0.037 | 5 |

表 3 拉伸强度数值表
Table 3 Value of tensile strength

| Sequence number | Tension /kN | Weld width /mm | Shear strength /MPa |
|-----------------|----------------|-------------------|------------------------|
| No. 1 | 0.646 | 1.98 | 10.20 |
| No. 2 | 0.912 | 2.10 | 13.57 |
| No. 3 | 0.402 | 2.65 | 4.74 |
| No. 4 | 0.123 | 2.90 | 1.33 |
| No. 5 | 0.173 | 2.78 | 1.94 |
| No. 6 | 0.893 | 2.55 | 10.94 |
| No. 7 | 0.680 | 2.37 | 8.97 |
| No. 8 | 0.654 | 2.76 | 7.40 |
| No. 9 | 0.236 | 3.24 | 2.28 |
| No. 10 | 0.495 | 5.05 | 3.06 |
| No. 11 | 0.739 | 1.61 | 14.34 |
| No. 12 | 0.534 | 2.94 | 5.68 |
| No. 13 | 0.355 | 3.10 | 3.58 |
| No. 14 | 0.540 | 4.30 | 3.92 |
| No. 15 | 0.764 | 5.80 | 4.11 |
| No. 16 | 0.278 | 3.48 | 2.50 |
| No. 17 | 0.085 | 2.54 | 1.04 |
| No. 18 | 1.419 | 2.94 | 15.08 |
| No. 19 | 0.879 | 2.40 | 11.45 |
| No. 20 | 0.516 | 3.44 | 4.69 |
| No. 21 | 0.911 | 2.56 | 11.12 |
| No. 22 | 1.005 | 2.31 | 13.60 |
| No. 23 | 0.511 | 3.70 | 4.32 |
| No. 24 | 0.568 | 1.73 | 10.26 |
| No. 25 | 0.229 | 4.42 | 1.62 |

由表 3 的剪切强度可以看出,实验 No. 18 的强

度最高,达到15.08 MPa;实验 No. 17 的强度最低,只有1.04 MPa。通过表 2 可以看到,实验 No. 18 和实验 No. 17 在激光平均功率、光斑直径和激光器频率方面几乎相同,而在焊接速度和夹具夹紧力方面变化较大,这说明焊接速度和夹具夹紧力对焊接强度的影响最大。通过表 3 可知,并不是焊接宽度越大,焊接强度就越高。焊接强度在10 MPa以上的几组实验,其对应的焊接宽度都在2 mm左右;而焊接宽度在4 mm以上的几组实验,其对应的焊接强度都在4 MPa以下。

根据表 3 测得的样品拉力和焊缝宽度的实验数据,运用极差法对实验数据进行了处理,如表 4 所示,分析结果如下:

1) 焊接因素对拉伸强度的影响

由表 4 得出的极差数值为: $R_A = 0.968, R_B = 1.29, R_C = 2.345, R_D = 1.748, R_E = 1.353, R_F = 1.634$ 。极差的排列顺序为: $R_C > R_D > R_F > R_E > R_B > R_A$, 所以各因素对焊接质量的影响大小顺序为:焊接速度>激光器的频率>焊接后冷却时间>夹具的夹紧力>光斑直径>激光器平均功率。因此,在以后聚丙烯焊接实验中,各因素水平应作如下选择:焊接速度:选择 $C_1, 1.5 \text{ mm/s}$;激光器的频率:选择 $D_4, 12 \text{ Hz}$;焊接后冷却时间:选择 $F_5, 30 \text{ s}$;夹具的夹紧力:选择 $E_2, 0.037 \text{ MPa}$;光斑直径:选择 $B_3, 4 \text{ mm}$;激光器平均功率选择: $A_5, 90 \text{ W}$ 。根据正交实验分析结果和拉伸测试结果所得的最佳焊接参数如表 5 所示。

表 4 焊接参数数值表及其分析

Table 4 Values and analysis of welding parameters

| Sequence number element | Average power /W | B | C | D | E | F | |
|-------------------------|------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|-------|
| | | Beam diameter /mm | Welding velocity / (mm/s) | Laser frequency /Hz | Fixture pressure /MPa | Cooling time /s | |
| Pull | I_j | 2.256 | 3.467 | 4.105 | 2.443 | 2.717 | 2.789 |
| | II_j | 2.958 | 3.216 | 3.959 | 2.608 | 3.535 | 2.477 |
| | III_j | 2.932 | 3.341 | 2.905 | 2.149 | 3.221 | 2.923 |
| | IV_j | 3.177 | 2.346 | 1.818 | 3.897 | 2.892 | 1.953 |
| | V_j | 3.224 | 2.177 | 1.760 | 3.450 | 2.182 | 3.587 |
| | R_j | 0.968 | 1.290 | 2.345 | 1.748 | 1.353 | 1.634 |
| Welding seam size | I_j | 12.41 | 12.09 | 16.58 | 15.30 | 14.81 | 14.27 |
| | II_j | 15.97 | 12.26 | 16.55 | 15.46 | 14.22 | 11.72 |
| | III_j | 17.66 | 15.15 | 11.62 | 16.46 | 15.60 | 20.92 |
| | IV_j | 14.80 | 14.57 | 16.50 | 16.57 | 14.30 | 15.71 |
| | V_j | 14.72 | 21.49 | 14.22 | 11.77 | 16.63 | 12.94 |
| | R_j | 5.25 | 9.40 | 4.96 | 4.80 | 2.41 | 9.20 |

表 5 实验分析结果和拉伸测试结果比较

Table 5 Comparison of experimental analysis and tensile test

| Sequence number element | Average power /W | B | C | D | E | F |
|--------------------------|------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|
| | | Beam diameter /mm | Welding velocity / (mm/s) | Laser frequency /Hz | Fixture pressure /MPa | Cooling time /s |
| Orthogonal Design result | A_5 | B_3 | C_1 | D_1 | E_2 | F_5 |
| Tensile result | 90 | 4 | 1.5 | 12 | 0.037 | 30 |
| | 80 | 4 | 1.5 | 12 | 0.037 | 30 |

表 5 表明由正交实验分析结果和拉伸测试结果所得出的最佳焊接参数基本一致,唯一不同的就是激光平均功率,但是激光平均功率在实验中的影响是最小的。根据这样的双重标准,可以得出:2 mm 厚度的聚丙烯塑料焊接的最佳实验参数是:焊接速度:1.5 mm/s;激光器频率:12 Hz;焊接后冷却时间:30 s;夹具的夹紧力:0.037 MPa;光斑直径:4 mm;激光器平均功率选择:90 W。

激光平均功率为 80 W 时,焊接速度对拉伸强度的影响如图 2 所示。可以看出:焊接速度越低,得到的拉伸强度越大。激光平均功率为 80 W 时,激光器频率对拉伸强度的影响如图 3 所示。可以看出:随着激光器频率的增大,样品的拉伸强度先增大后减小,在激光器频率为 12 Hz 时,拉伸强度达到最大值。这是因为在激光平均功率和速度一定的情况下,激光器频率越高,样品所吸收的激光能量越多,但是当激光器频率过高时,样品由于吸收了过多的激光能量而分解,从而使拉伸强度降低。

2) 焊接因素对焊缝宽度的影响

由表 4 得出的极差数值为: $R_A = 5.25, R_B =$

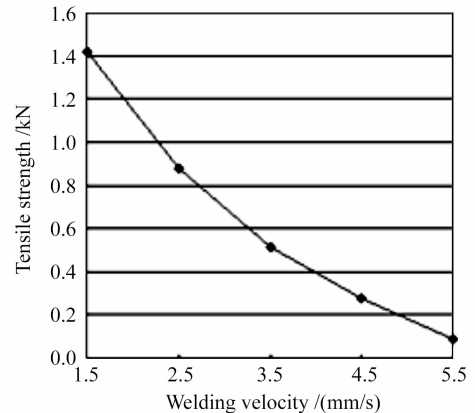


图 2 激光平均功率为 80 W 时,焊接速度对拉伸强度的影响

Fig. 2 Effect of welding velocity on tensile strength when laser average power is 80 W

9.4, $R_C = 4.96, R_D = 4.8, R_E = 2.41, R_F = 9.2$ 。极差的排列顺序如下: $R_B > R_F > R_A > R_C > R_D > R_E$, 所以各因素对焊缝尺寸的影响大小顺序为:光斑直径 > 焊接后冷却时间 > 激光器平均功率 > 焊接速度 > 激光器的频率 > 夹具的夹紧力。

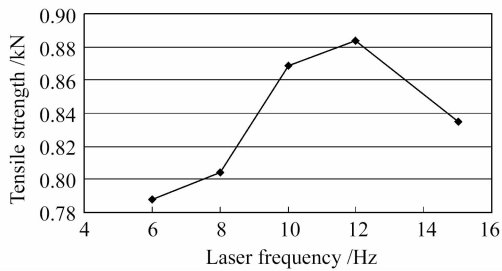


图3 激光平均功率为 80 W 时,激光频率对拉伸强度的影响

Fig. 3 Effect of laser frequency on tensile strength when laser average power is 80 W

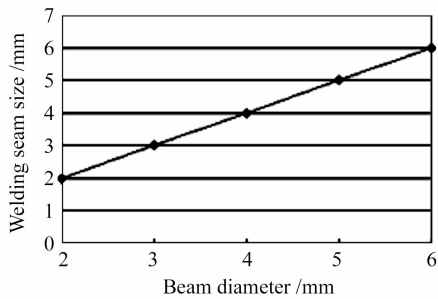


图4 激光平均功率为 70 W 时,光斑直径对焊缝宽度的影响

Fig. 4 Effect of laser diameter on welding width when laser average power is 70 W

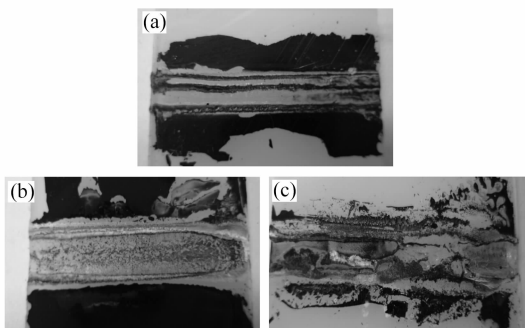


图5 光斑直径为 2 mm(a), 4 mm(b)和 6 mm(c)时的焊缝

Fig. 5 Welding line of laser diameter 2 mm (a), 4 mm (b) and 6 mm (c)

光斑直径对焊缝宽度的影响最大,如图 4 所示,当激光平均功率为 70 W 时,随着光斑直径的增大,焊缝宽度也随之增大,反之减小。这主要是因为光斑直径和焊接的热熔区域的大小直接联系,而热熔区域又直接决定着焊缝的宽度。光斑直径分别为 2 mm, 4 mm, 6 mm 时的焊缝如图 5 所示。可以看出,当光斑直径为 2 mm, 4 mm 时焊缝清晰可见,但是光斑直径达到 6 mm 时,焊缝就变得很模糊了。

在所有的焊接样品中,焊接强度较大时样品的

焊缝都比较均匀,而且焊缝的深度也比较深。例如聚丙烯焊接实验 No. 18 的焊缝就非常均匀,焊缝的深度比较深,如图 6 所示,拉伸强度最大达到 1.419 kN。

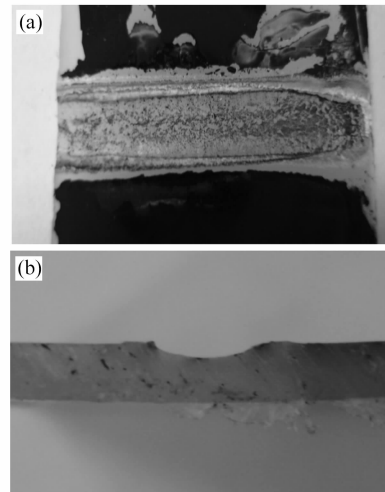


图6 实验 No. 18 的焊缝(a)和焊缝截面图(b)

Fig. 6 Welding line (a) and welding section (b) of experiment No. 18

5 讨 论

1) 激光器平均功率、光斑直径对焊接的影响

当激光平均功率较大、光斑直径较小时会产生较高的能量密度,焊接样品表面会出现黑色焊缝。出现这种现象的主要原因是激光能量密度太高,已经超出了使材料熔化所需要的能量,材料被碳化。可以通过降低激光平均功率或是增大光斑直径的方法来避免。

当激光平均功率较小、光斑直径较大时会产生较低的能量密度,此时由于材料得不到熔融所需要的能量,故而不能形成较好的焊接。激光平均功率为 50 W,光斑直径为 5 mm 时,聚丙烯的拉伸强度只有 0.123 kN,不到母材强度的 1/14。

2) 焊接速度、激光器频率对焊接的影响

焊接速度、激光器频率也是一对相互制约的影响因素,从光斑重合度的角度上讲,焊接速度低但激光频率高和焊接速度高但激光频率低效果是相同的。

从实验的结果看,当激光平均功率大小适中时,低速度、高频率可以形成较好的焊接,原因是低速度、高频率可以使焊接材料吸收足够的能量并将其转化成热量,有利于材料的熔融,从而形成质量较好的焊缝。

3) 夹紧力对焊接的影响

实验的夹紧力共有五组, 0.0065 MPa, 0.037 MPa, 0.067 MPa, 0.1 MPa, 0.15 MPa。实验结果发现夹紧力并不是越大越好, 当夹紧力在 0.067 MPa 左右时, 焊接样品的拉伸强度最大。原因是夹紧力过大阻碍了焊接区域的融合, 而夹紧力过小又达不到塑料融合所要的压力。

4) 焊缝对焊接强度的影响

焊接强度较大时样品的焊缝都比较均匀, 而且焊缝的深度也比较深。例如聚丙烯焊接实验 No. 18 的拉伸强度最大可以达到 1.419 kN。

5) 光斑直径对焊缝的影响

由实验数据看, 焊缝的宽度是和光斑直径成正比的。因为光斑直径直接决定热作用区域, 光斑直径大则热作用区域也大, 焊缝宽度就大, 反之则小。

6) 聚丙烯样品的伪断裂问题

实验 No. 1 拉力达到 0.646 kN 时, 样品母材发生断裂, 但是焊缝完好; 而实验 No. 18 拉力达到 1.419 kN 时, 样品母材没有断裂, 焊缝断裂。由于聚丙烯的母材能承受的最大拉力为 1.905 kN, 所以这是一种伪断裂现象, 其原因是焊接过程中受热不均, 导致焊缝不规则, 从而在拉伸时引起应力集中。

参 考 文 献

- Zhou Xingjian. Economical and effective plastic welding process [J]. *World Plastics*, 1996, (2):39~41
周兴健. 经济有效的塑料焊接工艺[J]. 国外塑料, 1996, (2): 39~41
- Cai Huiqing. Application of plastic parts ultrasonic riveted joint assembly process [J]. *Relay*, 1999, 27(3):63~64
蔡惠卿. 塑料零件超声波铆接装配工艺及应用[J]. 继电器, 1999, 27(3):63~64
- V. A. Kagan, 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, 23(1):95~107
- E. Haberstroh, R. Lützel. Influence of carbon black pigmentation on the laser beam welding of plastics micro parts [J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2001, 21(2-3):119~130
- J. Anon. Additives aid laser welding [J]. *Plastics, Additives and Compounding*, 2005, 7(1):34~35
- Wang Hailing, Huang Weiling, Zhou Zhuoyou *et al.*. Laser welding of 8 mm thick stainless steel plates [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, 30(5):463~466
王海林, 黄维玲, 周卓尤 等. 8 mm 厚不锈钢板的 Nd:YAG 激光焊接[J]. 中国激光, 2003, 30(5):463~466
- U. A. Russek, A. Palmen, H. Staub *et al.*. Laser beam welding of thermoplastics [C]. *SPIE*, 2003, 4977:458~472
- R. Prabhakaran, M. Kontopoulou, G. Zak *et al.*. Contour laser - laser transmission welding of glass reinforced nylon 6 [J]. *Journal of Thermoplastics Composite Materials*, 2006, 19:427~439
- P. C. Xie. America Heifusi declared a newest laser welding technique of plastics [EB/OL]. [2006-2-27]. <http://www.p-processing.com/ShowNewsID.asp?ID=2016>
- Leister machining technology corporation. Laser welding methods and equipment of joining plastics parts or plastics and other materials [P]. Switzerland:99101816.9, 2000-9-20
- Yuan Hui, Lai Jianjun, He Yungui. Experimental study on laser welding of thermoplastics [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, 3(1):18~21
袁 晖, 赖建军, 何云贵. 热塑性塑料的激光焊接实验研究[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(1):18~21
- Wang Youliang, Cui Ying, Wang Jianchao *et al.*. Technology of laser welding plastic [J]. *Applied Laser*, 2006, 26(2):93~96
王又良, 崔 瑛, 王健超 等. 塑料的激光焊接工艺[J]. 应用激光, 2006, 26(2):93~96