

文章编号: 1001-3806(2014)01-0001-05

## 高强镀锌钢激光填粉焊接工艺试验研究

徐磊<sup>1</sup>, 刘西霞<sup>1</sup>, 李庆福<sup>1</sup>, 胡光蓉<sup>2</sup>, 张屹<sup>1\*</sup>

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室 长沙 410082; 2. 中国航空工业集团公司 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

**摘要:** 为了研究高强镀锌钢激光填粉焊接工艺, 采用正交实验法优化了激光功率、焊接速度、离焦量等焊接工艺参数。结果表明, 激光填粉焊接速率过低时, 焊缝易于产生熔质堆积和焊接孔洞; 增大离焦量可实现粉末的有效利用; 装配间隙为 0.25mm (母材厚度的 31%) 时, 高强镀锌钢激光填粉焊接的最佳工艺参数为激光功率 1500W, 焊接速率 30mm/s, 离焦量 12mm, 此时, 焊缝表面成形良好, 其拉伸试验断裂产生在母材。

**关键词:** 激光技术; 工艺优化; 正交实验; 添加粉末

**中图分类号:** TG456.7 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.01.001

### Process study on laser welding of high strength galvanized steel with powder filling

XU Lei<sup>1</sup>, LIU Xixia<sup>1</sup>, LI Qingfu<sup>1</sup>, HU Guangrong<sup>2</sup>, ZHANG Yi

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd., Aviation Industry Corporation of China, Chengdu 610092, China)

**Abstract:** In order to optimize the process parameters in laser welding of high-strength galvanized steel with powder filling, orthogonal experimental tests were used to analyze such process parameters as laser power, welding speed and the defocusing distance. The test results show that the accumulation of the molten mass and the welding holes might occur at low welding speed; the defocusing distance should be increased to achieve the effective addition of the powder. The optimization process parameters for laser welding of high-strength galvanized steel with powder filling were 1500W laser power, 30mm/s welding speed and 12mm defocusing distance. Under these welding conditions, good weld performance was obtained and the base material was broken in tensile fracture tests.

**Key words:** laser technique; process optimization; orthogonal experiment; powder filling

## 引言

镀锌钢由于其良好的抗腐蚀性在汽车制造领域得到了广泛利用<sup>[1-2]</sup>。随着激光技术的高速发展和车身的轻量化趋势, 激光焊接因其焊接速度快、热影响区小、加工柔性好、易于自动化等优点<sup>[3-4]</sup>越来越多地应用于汽车制造。同时, 激光对接焊接替代传统的搭接焊将有效地降低车身重量, 提高白车身的

强度和刚度<sup>[5-7]</sup>。然而, 激光对接焊接要求工件的装配精度高<sup>[8-9]</sup>, 通常小于板厚的 15%。激光填粉焊接通过在焊接过程中实时金属粉末能有效降低焊接装配间隙, 提高工件间隙裕度。相较于填丝焊接相比, 填粉焊接能有效克服填充焊丝时诸如顶丝、对送丝机构精度要求高等一些局限, 便于改善和控制焊缝的组织成分, 具有更高的适应性<sup>[10]</sup>。作者采用光纤激光器对高强镀锌钢板进行了填粉对接焊实验, 研究了激光功率、焊接速度及离焦量等工艺参数对焊接质量的影响规律。

## 1 试验材料、设备及方法

### 1.1 试验材料

试验用试样尺寸为 100mm × 40mm × 0.8mm 的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175162); 湖南省自然科学基金重点资助项目(12JJ2032)

作者简介: 徐磊(1989-), 男, 硕士研究生, 现主要从事汽车车身激光焊接的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zy@hnu.edu.cn

收稿日期: 2013-04-01; 收到修改稿日期: 2013-04-19

HC300/500DPD + Z 高强镀锌钢板材。试验前试样表面采用化学处理方法去除表面氧化膜。因为铜元素可以与镀锌层锌元素发生固溶生成铜锌固溶体合金,减少镀锌钢激光焊接时中间锌层的蒸发和锌等离子体的形成。因此选择铜粉为添加元素,粉末纯度不大于 99.5%,粉末颗粒尺寸为 75 $\mu\text{m}$ 。母材的材料化学成分(质量分数)为碳 0.0018,硅 0.008,锰 0.022,磷 0.00035,硫 0.0003,其余成分为铁元素。

### 1.2 实验设备及方法

试验装置图如图 1 所示,试验采用 YLR-4000-C-WA 光纤激光器及其光导和水冷系统,YW50 焊接头。光纤激光器最大输出功率为 4.0kW,连续输出,波长为 1.07 $\mu\text{m}$ ,模式为 TEM<sub>00</sub>。采用芯径为 300 $\mu\text{m}$  的光纤进行光束传输,与焊接头上的 QBH 型标准接口进行光束耦合。焊接头准直聚焦系统由焦距为 150mm 准直镜和焦距为 200mm 的聚焦镜组成。送粉器为刮吸式双筒送粉器。自行开发的侧向

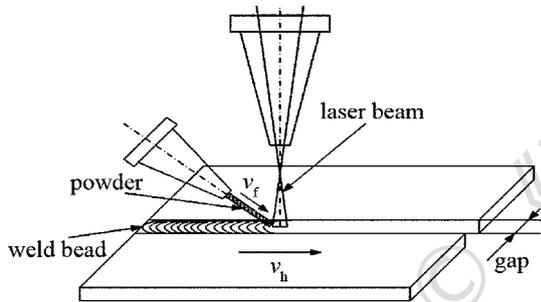


Fig. 1 Schematic diagram of the laser welding device with powder filling

Table 1 Orthogonal test table and the test results of high strength galvanized steel in laser welding with powder filling

serial number	laser power /W	welding speed / (mm · s <sup>-1</sup> )	defocusing distance/mm	tensile strength/MPa	yield strength/MPa	elongation /%	upper weld width/mm	lower weld width/mm
1	1300	15	6	392.72	364.21	3.32	1.38	2.09
2	1300	20	8	304.04	292.17	1.47	1.99	1.93
3	1300	25	10	449.37	377.73	21.34	1.69	1.62
4	1300	30	12	428.56	364.88	11.83	1.87	1.24
5	1400	15	8	444.17	383.42	19.90	1.59	2.41
6	1400	20	6	351.76	331.16	2.11	1.95	1.59
7	1400	25	12	409.86	375.13	6.65	1.46	1.51
8	1400	30	10	449.37	377.73	21.34	1.64	1.61
9	1500	15	10	449.37	377.73	21.34	2.95	2.30
10	1500	20	12	449.37	377.73	21.34	2.15	2.04
11	1500	25	6	199.62	186.25	3.00	1.22	1.62
12	1500	30	8	449.37	377.73	21.34	1.36	1.32
13	1600	15	12	449.37	377.73	21.34	1.91	1.96
14	1600	20	10	436.82	388.08	12.13	1.78	1.62
15	1600	25	8	270.39	246.86	7.01	2.06	1.68
16	1600	30	6	363.63	352.20	5.74	1.57	1.52

送粉喷嘴采用同轴双层设计,内层送粉,外层送气,气体既起到保护焊缝的作用,同时也有助于粉末束汇聚。金属粉末的载气、及汇聚保护气均采用氦气。

焊接工件的拉伸实验在 instron 5984 电子万能材料试验机上进行,拉伸速率为 2mm/min,拉伸试样尺寸按照 GB/T228-2002 进行制备。

### 2 实验结果及分析

选择不同的激光功率、焊接速度、离焦量及其它已优化工艺参量进行 16 次焊接试验,实际情况中,焊缝质量的主要评价标准包括焊缝的力学性能、焊缝表面形貌及焊缝微观组织等。其中,焊缝的力学性能主要包括焊缝抗拉强度、屈服强度及延伸率。焊缝表面形貌则包括焊缝熔宽及表面成形性。因此,本文中主要通过以上评价指标分析各工艺参量对焊缝性能的影响。

试验中采用的其它工艺参量如下:侧向保护汇聚气流量  $v_b = 15\text{L}/\text{min}$ ,送粉喷嘴与焊接工作平台夹角为  $\theta$ ,焊接间隙  $t = 0.25\text{mm}$ 、送粉速率  $v_f = 3.78\text{g}/\text{min}$ 。激光功率  $P$ 、焊接速率  $v_h$ 、离焦量  $f$  则根据光纤激光器对 0.8mm 厚的高强镀锌钢板焊接试验情况实际选取,如表 1 所示。试验设计中考虑了各因素的交互效应,因此采用正交试验法。试验选择的是 3 因素 4 水平的实验,如果进行各因素在所有水平范围内的焊接实验,则需要进行  $4^3 = 64$  次试验,而采用正交试验设计方法则只需进行 16 次试验

即可。实验的工艺参量见表 1。由表 1 可见,第 2 次、第 6 次、第 10 次和第 14 次试验的焊接速率均为 20mm/s,其它工艺参量均匀变化。根据正交试验的数据处理方法,各工艺参量的每一水平结果都是 4 次试验的平均值。那么,这 4 次试验结果的平均值表示焊接速率为 20mm/s 水平时对试验结果的影响。依次类推,可以求得各因素每一水平对试验结果的影响。在正交试验中由于有时会遇到各因素水平数不等的情况,根据正交试验的分析方法,用试验结果的平均值大小来反映同一因素的各个不同水平对试验结果的影响的大小,用同一因素各水平下平均试验结果的极差  $R$  (极差 = 平均试验结果的最大值 - 平均试验结果的最小值) 来反映各因素的水平变动对试验结果影响的大小。极差大就表示该因素的水平变动对试验结果的影响大,极差小就表示该因素的水平变动对试验结果的影响小。

其中 3 号、8 号、9 号、10 号、12 号和 13 号试件拉伸试验时均断裂在母材上,试验结果波动的原因因为材料不均匀,并不能说明焊缝本身的实际强度变化。因此,在分析焊接工艺参量对焊接质量的影响时,为避免因母材本身材料差异而导致的试验结果波动,将母材拉伸试验结果的平均值作为该 6 次试验的拉伸试验值。

### 2.1 激光功率对焊缝拉伸性能及熔宽影响

焊缝的拉伸性能是评价焊缝质量的主要因素之一。激光功率对焊缝拉伸性能的影响如图 2 所示。由图中可知,随着激光功率的增加,焊缝的抗拉强度、延伸率及屈服强度的波动变化不大也就是极差不大,且功率越大焊缝的拉伸强度有降低的趋势。实验结果表明,在填粉焊接时,焊缝拉伸性能对激光功率并不敏感,激光功率对抗拉强度影响不大。

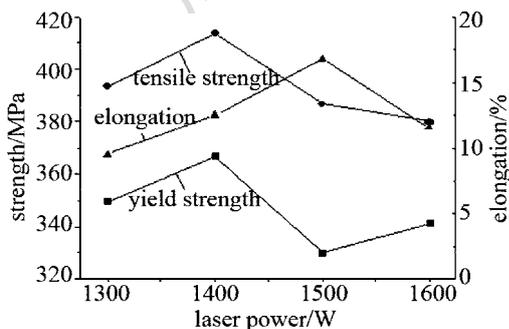


Fig. 2 The influence of laser power on the tensile properties of weld bead

焊缝熔宽则是焊缝质量的另一评价指标。由图 3 可知,随着激光功率的增加,焊缝上表面熔宽极差

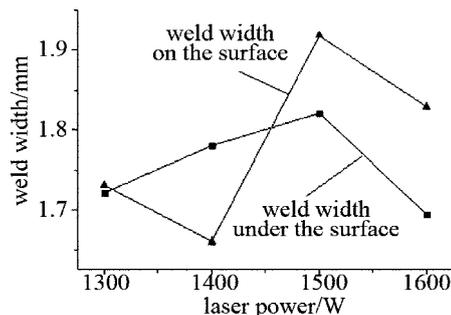


Fig. 3 The influence of laser power on the weld width

较大,下表面熔宽变化则不明显,激光功率为 1600W 时,下表面熔宽显著降低,且处在最低点,导致这一结果的原因为激光能量输入不足,使能量无法有效传递到焊缝母材下层。结合图 2 中激光功率对焊缝拉伸性能的影响,实验结果说明,激光功率在 1300W ~ 1600W 这个范围内焊缝质量对功率变化不敏感,且功率为 1600W 时的拉伸强度降低原因为激光能量输入不足。

### 2.2 焊接速率对焊缝拉伸性能及熔宽影响

图 4 所示为焊接速率对焊缝拉伸性能的影响。由图中可知,焊接速率对焊缝拉伸性能各指标的影响趋势基本一致。焊接速率对焊缝拉伸性能影响很大,在焊接速率从 15mm/s 到 25mm/s 时,焊缝抗拉强度线性降低。

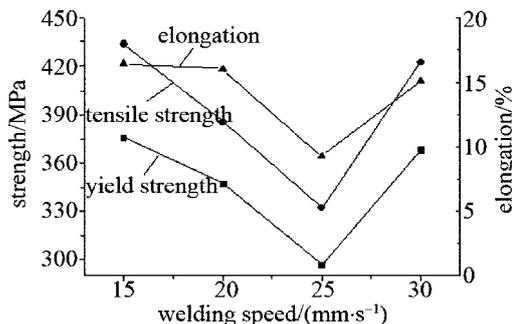


Fig. 4 The influence of weld speed on the tensile properties of weld bead

焊接速率对焊缝熔宽也有很大影响。由图 5 可知,在焊接速率处于较低水平时,由于单位时间内热

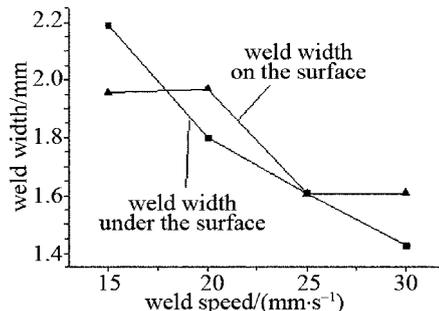


Fig. 5 The influence of weld speed on the weld width

输入量较大,焊缝上表面熔宽处在较高水平。当焊接速率升高到 25mm/s 时,焊缝上表面熔宽产生陡降。焊接速率对焊缝下表面熔宽的影响则更为明显。随着焊接速率的增加,焊缝下表面熔宽呈现线性下降的趋势。

### 2.3 离焦量对焊缝拉伸性能及熔宽影响

离焦量也是影响焊缝质量的主要因素之一。如图 6 所示,离焦量的焊缝的拉伸性能影响明显,在 6mm~8mm 范围内,随着离焦量的增加,焊缝抗拉强度线性增加。当离焦量增加到 12mm 时焊缝抗拉强度变化趋于平缓。

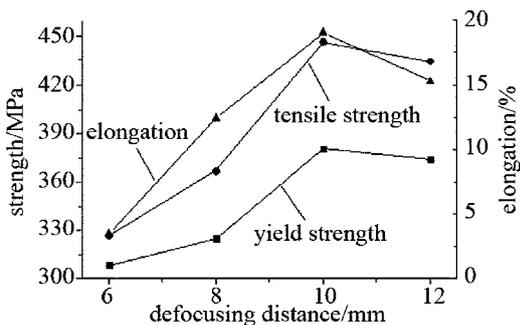


Fig. 6 The influence of defocusing distance on the tensile properties of weld bead

与焊缝抗拉强度变化趋势相对应,焊缝上表面熔宽随着离焦量的增加也呈现线性增加的趋势。而离焦量增大到 12mm 时,焊缝熔宽没有继续增加的原因则是焊缝热输入不足,需要增加激光功率。离焦量的变化则对焊缝下表面熔宽影响不明显,离焦量的增加反而逐渐降低了焊缝下表面熔宽。这进一步说明焊缝的热输入不足,离焦量的增加降低了能量输入密度,导致焊缝下层能量输入进一步降低。如图 7 所示,实验结果表明,在有足够能量输入的情况下,离焦量增加有利于焊缝拉伸强度的提高。

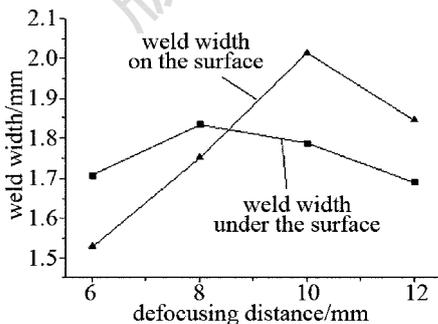


Fig. 7 The influence of defocusing distance on the weld width

## 3 焊缝形貌分析

### 3.1 焊接速度对焊缝形貌的影响

由第 2 节中的分析可知,在 1300W~1600W 变

动范围内,激光功率对焊缝拉伸性能影响并不大。因此,本文中着重分析焊接速率对焊缝质量的影响。选取离焦量为最佳值也就是  $f = 10\text{mm}$  时的试验组进行对比。由表 1 可知,离焦量为  $f = 10\text{mm}$  的试验组分别为 9 组、14 组、3 组、8 组,其焊接速率  $v_h$  分别为 15mm/s、20mm/s、25mm/s、30mm/s。根据图 4 可知,在焊接速率为 15mm/s 及 30mm/s 时焊缝的拉伸性能相对较好,进一步对比分析焊接速率为 15mm/s 及 30mm/s 时的焊缝表面形貌。由图 8a 和图 8c 可知,焊接速率  $v_h = 15\text{mm/s}$  时,焊缝上表面产生较高堆积,且焊缝中不间断的产生孔洞。因此,在焊接速率为 15mm/s 时,焊缝强度较高的主要原因是低焊接速度下焊缝中部分焊缝段熔质集中,焊缝强度得以提高。实际焊接过程中焊缝质量较差。而当焊接速率为 30mm/s 时,由图 8b 和图 8d 可知,焊缝上下均表面成形良好,且焊缝熔宽较焊接速率为 15mm/s 时显著降低。因此,焊接速率为 30mm/s 时焊缝性能最好。

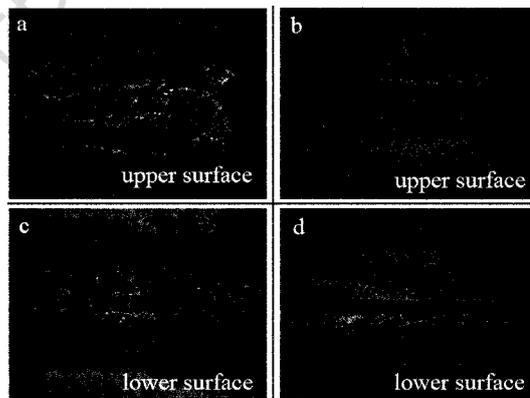


Fig. 8 Influence of weld speed on the weld surface morphology  
a, c— $P = 1500\text{W}$ ,  $v_h = 15\text{mm/s}$ ,  $f = 10\text{mm}$  b, d— $P = 1400\text{W}$ ,  $v_h = 30\text{mm/s}$ ,  $f = 10\text{mm}$

### 3.2 离焦量对焊缝形貌的影响

选择焊接速率为 30mm/s 时,对另一重要影响工艺参量(离焦量)进行分析。由表 1 可知,焊接速率为 30mm/s 时,第 16 组、第 12 组、第 8 组、第 4 组试验的离焦量  $f$  分别为 6mm、8mm、10mm、12mm。根据图 6 可知,焊缝的拉伸性能在离焦量  $f = 10\text{mm}$  时达到最佳。离焦量为 10mm 时焊缝表面成形如图 8b 和图 8d 所示。为研究离焦量对焊缝成形的影响,分析了离焦量  $f$  在 6mm 和 12mm 时的焊缝表面形貌。如图 9a 和图 9c 所示,离焦量  $f = 6\text{mm}$  时,因装配间隙的较大,激光光斑无法有效照射在试验工件表面。焊缝上无法形成熔池,所填粉末无法有效

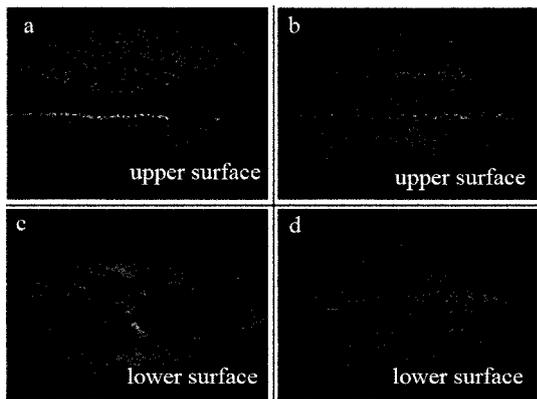


Fig. 9 The influence of defocusing distance on the weld surface morphology  
 a, c— $P = 1600\text{W}$ ,  $v_h = 30\text{mm/s}$ ,  $f = 6\text{mm}$  b, d— $P = 1300\text{W}$ ,  
 $v_h = 30\text{mm/s}$ ,  $f = 12\text{mm}$

输送到焊缝熔池中, 试验工件无法被焊合。而离焦量  $f = 12\text{mm}$  时, 焊缝无明显缺陷, 焊缝表面成形良好, 如图 9b 和图 9d 所示。

结合第 2.3 节中离焦量对焊缝拉伸性能的影响分析, 离焦量的增加能提高焊缝强度, 在离焦量为  $12\text{mm}$  时的焊缝拉伸性能降低是由于激光功率密度过低导致的能量输入不足。若适当提高激光功率, 则在离焦量为  $12\text{mm}$  时的焊缝质量也能得到有效提高。因此选择激光功率  $P = 1500\text{W}$ 、焊接速率  $v_h = 30\text{mm/s}$ 、离焦量  $f = 12\text{mm}$  为激光填粉焊接时的最佳工艺参量。焊缝拉伸强度达到或者超过母材强度, 焊缝表面成形良好, 如图 10 所示。

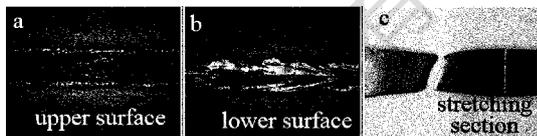


Fig. 10 The welding quality of optimization on process parameter  
 ( $P = 1500\text{W}$ ,  $v_h = 30\text{mm/s}$ ,  $f = 12\text{mm}$ )

## 4 结 论

高强镀锌钢填粉激光焊接时, 焊接速率和离焦量对焊缝质量影响大。

(1) 焊接速率过低时, 焊缝上会产生熔质堆积和焊接孔洞, 填粉将增加熔质堆积现象。

(2) 随着离焦量的增加, 焊缝拉伸性能逐渐增加。在装配间隙为  $0.25\text{mm}$  时, 离焦量过小将导致焊缝中无法形成熔池, 所填粉末无法有效利用。当离焦量达到  $12\text{mm}$  时, 激光功率应同步增加以增加激光功率密度, 保证焊缝热输入。

(3) 激光功率为  $1500\text{W}$ 、焊接速率为  $30\text{mm/s}$ 、离焦量为  $12\text{mm}$  时, 激光填粉焊接能实现装配间隙为  $0.25\text{mm}$  (母材厚度的  $31\%$ ) 的试件的焊接, 且焊缝表面平顺, 焊缝拉伸性能良好, 拉伸断裂产生在母材上。

## 参 考 文 献

- [1] ZHAO Y, ZHANG Y, HU W, *et al.* Optimization of laser welding thin-gage galvanized steel via response surface methodology [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(9):1267-1273.
- [2] CHEN G Y, CAI X, TAN L P, *et al.* Effect of align deviation value on fiber laser welding property of automotive galvanized steel [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5): 577-581 (in Chinese).
- [3] CUI L, ZHANG Y Ch, HE D Y, *et al.* Research progress of high power fiber laser welding [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(2): 154-159 (in Chinese).
- [4] DONG Q F, YAN C, LIAO X Y. Experimental investigation on laser welding dissimilar materials between galvanized steel and carbon steel plates [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5): 665-669 (in Chinese).
- [5] RIBOLLA A, DAMOULIS G L, BATALHA G F. The use of Nd:YAG laserweld for large scale volume assembly of automotive body in white [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 164/165: 1120-1127.
- [6] MEI L, CHEN G, JIN X, *et al.* Research on laser welding of high-strength galvanized automobile steel sheets [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(11):1117-1124.
- [7] WU Q, GONG J, CHEN G, *et al.* Research on laser welding of vehicle body [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(2): 420-426.
- [8] CHEN Y Q, GAO X D, HUANG J Y, *et al.* Detection of weld seam position based on infrared image during high power fiber laser welding [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 549: 1007-1011.
- [9] KAWAHITO Y, KITO M, KATAYAMA S. In-process monitoring and adaptive control for gap in micro butt welding with pulsed YAG laser [J]. *Journal of Physics*, 2007, D40(9):2972.
- [10] ZHANG Sh H, CHEN K, XIAO R Sh, *et al.* Influence of metal powder on high power CO<sub>2</sub> laser welding of aluminum [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(6):860-863 (in Chinese).