

镀锌钢板搭接光纤激光焊接中搭接间隙的研究

张帆¹ 李芳^{1*} 王诗恩² 王大明² 褚卫东² 华学明¹

(¹上海交通大学激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)
²上海拖拉机内燃机有限公司, 上海 200433)

摘要 研究镀锌钢板搭接激光焊接技术对汽车工业激光焊接具有重要意义。研究了搭接间隙对光纤激光焊接镀锌钢板焊缝成形和接头机械性能的影响, 分析了预留间隙法解决镀锌钢板搭接激光焊中高压锌蒸气对焊缝的不良影响的机理, 通过实验研究了激光功率和搭接间隙的工艺参数范围。研究表明, 对于 1.35 mm 板厚的 HC260LAD+Z 100 MB 镀锌钢板搭接激光焊, 间隙大于 0.1 mm 时, 可以很好地抑制锌蒸气造成的焊接缺陷; 间隙约为 0.15 mm 时, 焊缝熔深达到最大值; 4 kW 激光功率对间隙的容忍度较大, 对于 0.05~0.2 mm 板间间隙都可以得到良好的焊缝。

关键词 激光光学; 光纤激光焊接; 搭接焊; 预留间隙法; 镀锌钢板

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1003011

Research of Lap Gap in Fiber Laser Lap Welding of Galvanized Steel

Zhang Fan¹ Li Fang¹ Wang Shien² Wang Daming² Chu Weidong² Hua Xueming¹

[¹Key Laboratory of Laser Processing and Material Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
²Shanghai Tractor and Internal Combustion Engine Co., Ltd, Shanghai 200433, China]

Abstract The research on laser lap welding of galvanized steels in automobile industry is very significant. The effects of gap on the features and mechanical properties of welding seam are analyzed. Meanwhile, the impact of setting small gap between faying surfaces on suppressing defects that caused by zinc vapor is studied and verified by experiments. The range of laser power and lap gap is also investigated. The outcome implies that for laser lap welding of HC260LAD+Z 100 MB galvanized steel sheet whose thickness is 1.35 mm, gaps exceeding 0.1 mm will suppress the defects caused by zinc vapor effectively. Penetration reaches the maximum value when the gap is about 0.15 mm. Greater laser power of 4 kW, has better tolerance on gap from 0.05~0.2 mm.

Key words laser optics; fiber laser welding; lap welding; gap setting method; galvanized steel

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 060.3510

1 引言

搭接是将两块或多块金属板材进行部分重叠, 在一定宽度的重叠处进行焊接, 形成搭接接头的焊接方法。传统的车身框架焊接通常使用电阻点焊的

方法, 电阻点焊虽然工艺较成熟、焊接效率较高, 但电阻点焊零部件收到点焊直径的影响, 搭接量较大, 边缘宽度一般至少大于 16 mm, 用钢量较大; 同时电阻点焊为接触加工, 点焊空间位置限制较多^[1-2]。

收稿日期: 2014-04-03; **收到修改稿日期**: 2014-05-08

作者简介: 张帆(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事汽车车身用钢激光焊接方面的研究。

E-mail: koslowskizhang@outlook.com

导师简介: 华学明(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事焊接电弧物理及高效焊接新技术等方面的研究。

E-mail: xmhua@sjtu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: lifang302@sjtu.edu.cn

激光焊接的应用很大程度上解决了这些问题,提高了车身的制造精度,而且也符合远程焊接的发展要求,基本上达到了代替电阻点焊的要求^[3]。2000年,美国的主要汽车公司已经将激光焊接应用于约50%的焊接生产线^[1]。随着大功率光纤激光器逐渐进入市场,光纤激光器越来越多地应用于车身焊接上^[4]。与传统激光器相比,光纤激光器能量转换效率高,光束质量更好,并且激光可达性好,适合于柔性加工,所以光纤激光器的激光焊接应用得到了多方开展,光纤激光器的发展也促进了激光焊接在车身制造上的应用^[5-7]。

在当前的白车身设计中,镀锌钢板已广泛代替传统的冷轧钢板,以提高车身的防腐性能。在车身前纵梁等重要车身部件中,已有制造商开始将激光焊接工艺应用于镀锌钢板的搭接焊以代替电阻点焊,而由于镀锌层的存在使得镀锌钢板的搭接激光焊难度增加。由于锌的沸点(906℃)比钢的熔点(约1500℃)低得多,焊接过程中的锌蒸气压远远大于铁的蒸气压。同时锌的电离能(9.36 eV)大于铁的电离能(7.83 eV),电离顺序上并不优先于铁,所以锌蒸气的存在并不加速等离子体的生成^[8]。相比于没有镀锌层的钢板,镀锌钢板搭接焊的主要区别在于高压锌蒸气的存在^[9-10]。为了解决高压锌蒸气对焊缝成形的影响,研究人员提出了数种方法,包括预留间隙法、预留通孔法、双激光束法、激光-电弧复合焊、添加合金元素法等^[11-16]。其中,预留间隙法是将板间间隙作为上下板重叠部分锌层所形成的高压锌蒸气的逃逸通道,以减小高压锌蒸气对熔池稳定性干扰的方法。在实际应用时,预留间隙法相比其他方法需要引入的设备更少,技术难度相对较低^[11,17]。

为了能够更好地为镀锌钢板搭接光纤激光焊接工艺提供理论指导,本文在预留间隙法可行性得到

确定的研究基础上,进一步研究间隙大小对焊接质量的影响,利用正交实验组对比不同间隙和激光功率对焊接接头成形及质量的影响规律,通过系统实验寻找合适的参数范围。

2 实验内容

2.1 实验材料与实验装置

本文研究镀锌钢板的搭接激光焊,焊接实验平台如图1所示。实验所使用激光器为IPG-YLS-10000光纤激光器,波长为1070 nm,最大功率为10 kW,实验中激光模式为基模TEM₀₀,光斑直径为0.6 mm,连续输出激光。焊接时采用纯氩作为保护气。

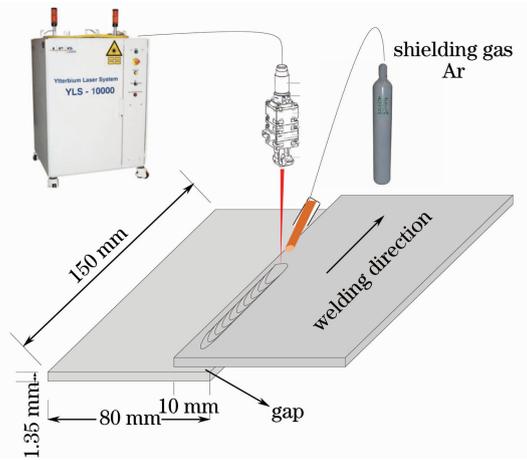


图1 搭接焊实验平台示意图

Fig. 1 Platform for lap welding experiments

实验使用牌号为HC260LAD+Z 100 MB的镀锌钢板,为双面热镀锌钢板,化学成分如表1所示,力学性能如表2所示。HC260LAD+Z 100 MB为采用热镀锌法对冷轧基板进行镀层处理得到的产品,基板为高强度低合金钢,表面为纯锌镀层,镀层重量(双面最小镀层重量)为100 g/m²。实验所用板材厚度为1.35 mm,实验所用试板为规格150 mm×80 mm。

表1 实验材料的化学成分[质量分数(最大值),%]

Table 1 Chemical component of experiment materials[mass fraction (max), %]

Steel grade	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb
H260LAD	0.11	0.50	0.60	0.025	0.025	0.015	0.15	0.09

表2 实验材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of experiment materials

Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation A _{80mm}
260~330	350~430	≥26%

拉剪实验中,为了尽可能得到焊缝所能承受的最大拉剪力,并结合实际生产中对点焊焊点的拉剪方式,将焊件制成非标准拉伸试样进行拉剪实验,同

时在实验中保证上下夹头位置距离统一为60 mm,拉伸速度为2 mm/min^[18]。拉剪试样尺寸为100 mm×30 mm×1.35 mm(长度×宽度×厚度),

如图 2 所示。

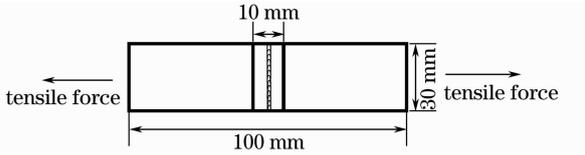


图 2 焊缝室温拉剪实验

Fig. 2 Tensile shear tests of welding seam at room temperature

2.2 实验设计

实验中板间间隙从小到大分别为 0、0.05、0.1、0.15、0.2 mm。在不同的板间间隙下,分别进行 3

表 3 板间间隙和激光功率参数

Table 3 Parameters of gap and laser power

Specimen No	Lap gap /mm	Laser power /kW
1		2
2	0	3
3		4
4		2
5	0.05	3
6		4
7		2
8	0.1	3
9		4
10		2
11	0.15	3
12		4
13		2
14	0.2	3
15		4

组不同激光功率的搭接焊实验,实验参数如表 3 所示。其他实验参数保持不变,如表 4 所示。

表 4 其他固定不变的焊接参数

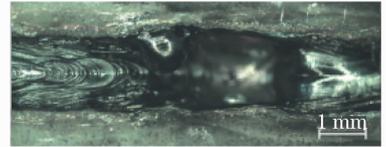
Table 4 Other consistent welding parameters

Parameters	Values
Welding velocity	3 m/min
Shielding gas Ar flow	15 L/min
Shielding gas blowing angle	45°
Inner diameter of blowpipe	8 mm
Blowing direction	Opposite to welding direction
Defocusing amount	0

3 实验结果与讨论

3.1 焊缝表面形貌与宏观金相

通过观察表面形貌,初步判断焊缝的成形情况。当间隙为 0 时,试样 2 和试样 3 的焊缝表面凹坑非常明显,凹坑形貌如图 3 所示。因激光功率较小,试样 1 未形成凹坑。当间隙为 0.05 mm 时,凹坑缺陷即可得到抑制,几乎未观察到焊接飞溅;当间隙继续增大到为 0.1、0.15、0.2 mm 时,焊缝表面成形平整,无明显变化图 4 所示。



specimen 2, gap 0 mm, laser power 3 kW

图 3 零间隙时的焊缝表面凹坑

Fig. 3 Surface pits when lap gap is absent

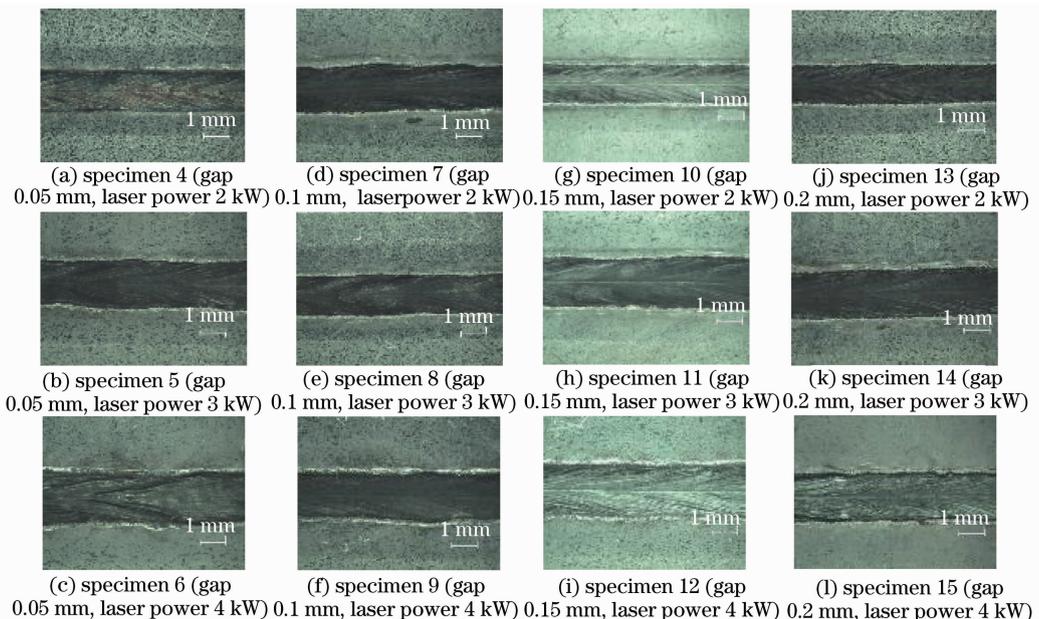


图 4 预留间隙后焊缝表面正面形貌

Fig. 4 Front surface of welding seams when the lap gap is set

为了观察焊缝横截面形貌,截取焊缝进行镶嵌,经磨抛及腐蚀后拍摄横截面的宏观金相,同时测量得到焊缝的熔深和熔宽。从拍摄得到的宏观金相(图5)可以看到,当激光功率 $P=2\text{ kW}$ 时,激光功率小未形成焊缝,随着激光功率增加,熔深增加,当激光功率 $P=4\text{ kW}$ 时,熔深均大于两层板的总厚度,板材被焊透。

从宏观金相中可以看到,当激光功率为 3 kW 时,试样2有较大凹坑,试样5有明显的咬边,试样8、11、14(板间间隙分别为 $0.1、0.15、0.2\text{ mm}$)得到了较为理想的焊缝形貌;当激光功率为 4 kW 时,除了未预留间隙的试样3,试样6、9、12、15(板间间隙分别为 $0.05、0.1、0.15、0.2\text{ mm}$)均得到了较为理想的焊缝形貌。

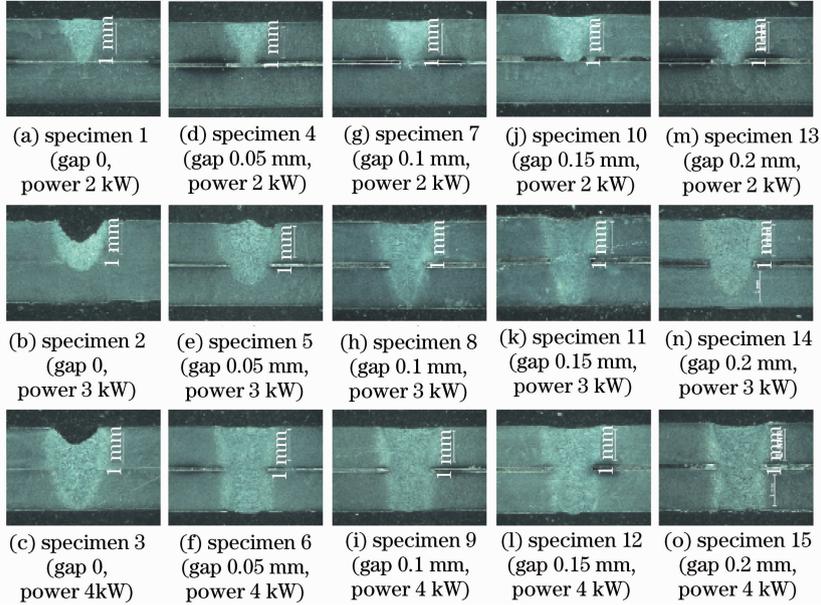


图5 焊缝横截面宏观金相

Fig. 5 Macro metallograph of cross sections of welding seams

通过宏观金相测量焊缝的熔深和熔宽,得到不同间隙对焊缝几何尺寸的影响,如图6所示。当激光功率为 4 kW 且预留间隙时,激光所能达到的熔深都大于两板总厚度;当激光功率为 3 kW 时,间隙在 0.15 mm 左右时熔深达到最大值。根据文献[19]中的经验,当板间间隙大于 0.2 mm 并进一步增大时,搭接焊连接更为困难,不易得到有效焊缝。而形成有效焊缝的各组试样中,熔宽(熔合面处)没有明显的变化规律,受到间隙和激光功率的影响不大(图7)。

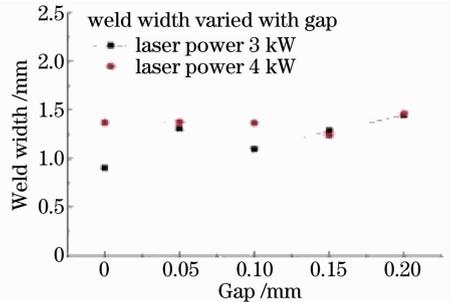


图7 间隙对熔宽的影响

Fig. 7 Effects of gap on weld width

3.2 焊缝拉剪实验

对于实验得到的焊缝,进行了拉剪实验。通过研究拉剪实验的最大拉剪力和断裂位置,得到焊缝的强度性能。

当间隙为 0 时,试样2和试样3焊缝拉剪断裂在焊缝上板的位置,如图8所示。试样1的实验中激光功率较小,未形成有效焊缝;试样2、试样3焊缝的拉剪实验断裂位置在焊缝处,最大拉剪力有明显下降。根据力学分析,凹坑的存在大大减小了焊缝处拉剪载荷的作用面积,使得接头所能承受的载

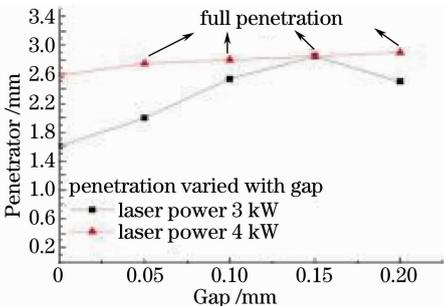


图6 间隙对熔深的影响

Fig. 6 Effects of gap on penetrations

荷远低于母材。

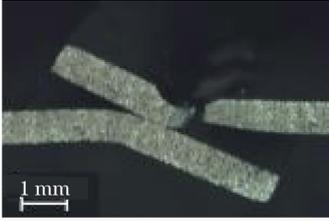


图8 凹坑造成接头强度下降(试样2,间隙0,功率3 kW)

Fig. 8 Strength reduction caused by pits
(Specimen 2, gap 0, power 3 kW)

当间隙为 0.05 mm 时,在拉剪实验中,试样 6 断裂位置为母材,试样 5 焊缝的断裂位置为熔合面(图 9)。在试样 5 断裂的熔合面上,可以观察到孔径为 0.5~1 mm 的气孔,气孔尺寸达到与熔合面宽度相近的大小,如图 10 所示。气孔的存在同样减小了载荷的作用面积,焊缝易在气孔处开始发生断裂。

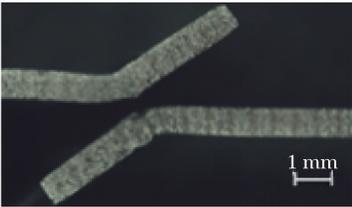


图9 断裂在熔合面(试样5,间隙0.05 mm,功率3 kW)

Fig. 9 Fracture on the faying surface
(Specimen 5, gap 0.05 mm, power 3 kW)

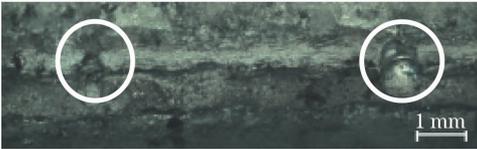


图10 熔合面断裂处的气孔

Fig. 10 Pores on the faying surface

当间隙为 0.1、0.15 和 0.2 mm 时,除了激光功率为 2 kW 的实验试样未形成有效焊缝,其余焊缝在拉剪实验中的断裂位置均位于母材上,焊缝强度大于母材,较为理想,典型断口位置如图 11 所示。



图11 断裂位置为母材的典型试样
(试样12,间隙0.15 mm,功率3 kW)

Fig. 11 Typical specimen whose fracture location is
base metal (Specimen 12, gap 0.15 mm, power 3 kW)

综上所述,试样 8、11、14 以及试样 6、9、12、15 在拉剪实验中均断裂在母材上。当激光功率为

3 kW 时,0.1~0.2 mm 的间隙大小范围可以满足拉剪强度要求;当激光功率为 4 kW 时,0.05~0.2 mm 的间隙大小范围可以满足拉剪强度要求。

3.3 结果讨论

在镀锌钢板的搭接激光焊中,为高压锌蒸气提供足够的逃逸空间是解决其对焊缝成形不良影响的最直接的方法。锌蒸气的逃逸通道主要有熔池、匙孔和板间间隙,如图 12 所示。增加从板间间隙逃逸的比例,可以减少因锌蒸气进入熔池和匙孔对焊缝成形造成的影响^[8]。随着板间间隙的增加,焊接过程中板间的高压锌蒸气的逃逸空间显著增大,由高压锌蒸气造成的凹坑和飞溅发生的几率亦将随之下降。

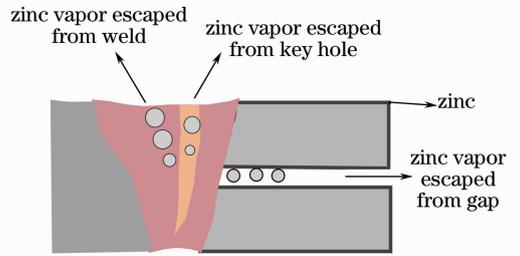


图12 锌蒸气的逸出方式

Fig. 12 Escape path of zinc vapor

对于镀锌钢板搭接激光焊的锌蒸气逃逸,Akhter 等^[20]给出了理论模型的公式,锌蒸气的产生速率 φ_{gen} 和逃逸速率 φ_{ecs} 公式为

$$\varphi_{\text{gen}} = \frac{(\omega + 2b)Vt_{\text{zn}}\rho_s}{\rho_v} (\text{m}^3/\text{s}), \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{ecs}} = \frac{v_2 \pi (\omega + 2b)g}{2} (\text{m}^3/\text{s}), \quad (2)$$

式中 ω 为熔宽(m), b 为热影响区宽度(m), V 为焊接速度(m/s), t_{zn} 为镀锌层厚度(m), ρ_s 为固态锌密度(kg/m^3), ρ_v 为锌蒸气密度(kg/m^3), v_2 为锌蒸气在间隙中的行走速度(m/s), g 为间隙大小(m)。

从(1)、(2)式中看出,对于特定板材,锌蒸气的产生速度主要取决于焊接速度和熔宽,而逃逸速度取决于熔宽、蒸气行走速度和间隙大小。从实验结果可知,对于不同的间隙和激光功率,熔宽没有明显变化,考虑到实验中焊接速度保持不变,所以锌蒸气的产生速率基本保持一致。随着间隙大小的增大,根据(2)式,锌蒸气的逃逸速率增大,在相同的焊接速度下,更大的间隙明显有利于锌蒸气的逸出,减少形成气孔等缺陷的可能性。

4 结 论

针对 HC260LAD+Z 100 MB 镀锌钢板的两层

搭接激光焊,保持焊接速度为 3 m/min,离焦量为 0,保护气氩气送气速度为 15 L/min,仅通过改变板间间隙和激光功率,研究板间间隙和激光功率的大小对焊缝成形的影响,得到以下结论。

1) 预留间隙法可以很好地解决高压锌蒸气造成的焊接缺陷问题。间隙小于 0.05 mm 时,焊缝中依然可能存在尺寸较大的气孔,焊缝拉剪时容易在气孔处开始发生断裂,降低焊缝的力学强度;在间隙为 0.1~0.2 mm 的范围内容易得到成形理想的焊缝。

2) 激光功率的增大,对于板间间隙的容忍度较大,当激光功率为 4 kW 时,间隙为 0.05~0.2 mm 范围内均能得到理想的焊缝。在实际应用中能降低对间隙控制的要求,焊接质量更容易得到控制。

参 考 文 献

- Chen Yihong. The applications of laser welding in automobile industry[J]. *Automobile Parts*, 2012, (7): 29-30.
陈义红. 激光焊接在汽车行业中的应用[J]. *汽车零部件*, 2012, (7): 29-30.
- Ugur Ozsarac. Investigation of mechanical properties of galvanized automotive sheet joined by resistance spot welding[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, 21(5): 748-755.
- Wang Guangyong. Advanced welding technology of automobile body[J]. *Electric Welding Machine*, 2013, 43(2): 1-7.
王广勇. 先进的车身焊接技术[J]. *电焊机*, 2013, 43(2): 1-7.
- John Canning. Fibre lasers and related technologies[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(7): 647-676.
- L Quintino, A Costa, R Miranda, *et al.*. Welding with high power fiber lasers-a preliminary study[J]. *Materials and Design*, 2007, 28(4): 1231-1237.
- Cui Li, Zhang Yanchao, He Dingyong, *et al.*. Research progress of high power fiber laser welding[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(2): 154-159.
崔 丽, 张彦超, 贺定勇, 等. 高功率光纤激光焊接的研究进展[J]. *激光技术*, 2012, 36(2): 154-159.
- Xu Guojian, Li Xiang, Hang Zhengxiang, *et al.*. Laser welding of high strength steel using fiber laser and CO₂ laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 031403.
徐国建, 李 响, 杭争翔, 等. 光纤激光及 CO₂ 激光焊接高强度钢[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 031403.
- Zhang Yi, Li Shichun, Jin Xiangzhong, *et al.*. Key technology of laser welding of galvanized steel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(7): 071401.
张 屹, 李时春, 金湘中, 等. 镀锌钢板激光焊接关键技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(7): 071401.
- H Bley, L Weyand, A Luft. An alternative approach for the cost-efficient laser welding of zinc-coated sheet metal[J]. *Annals of the CIRP*, 2007, 56(1): 17-20.
- Y Pan, I M Richardson. Keyhole behavior during laser welding of zinc coated steel[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44(4): 045502.
- Hongping Gu. Laser lap welding of zinc coated steel sheet with laser-dimple technology[J]. *Journal of Laser Applications*, 2010, 22(3): 87-91.
- X Li, S Lawson, Y Zhou, *et al.*. Novel technique for laser lap welding of zinc coated sheet steels [J]. *Journal of Laser Applications*, 2007, 19(4): 259-264.
- Weichiat Chen, Paul Ackerson, Pal Molian. CO₂ laser welding of galvanized steel sheets using vent holes [J]. *Materials and Design*, 2009, 30(2): 245-251.
- M M S Gualini, S Iqbal, F Grassi. Modified dual-beam method for welding galvanized steel sheets in lap configuration [J]. *Journal of Laser Applications*, 2006, 18(3): 185-191.
- S L Yang, R Kovacevic. Welding of galvanized dual-phase 980 steel in a gap-free lap joint configuration[J]. *Welding Research*, 2009, 88(8): 168-178.
- Li Fei, Zou Jianglin, Kong Xiaofang, *et al.*. Experimental research on high power fiber laser-TIG hybrid welding [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0503004.
李 飞, 邹江林, 孔晓芳, 等. 高功率光纤激光-TIG 复合焊接[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0503004.
- R Akhter, W M Steen, D Cruciani. Laser welding of zinc coated steel[C]. *Proc of the 5th Int Conf Lasers in Manufacturing*, 1988, 5: 195-206.
- Gu Chunying, Chen Genyu, Mei Lifang, *et al.*. Analysis on laser lap welding and resistance spot welding of auto body components [J]. *Hot Working Technology*, 2011, 40(17): 136-142.
顾春影, 陈根余, 梅丽芳, 等. 汽车零部件的激光搭接与电阻点焊对比分析[J]. *热加工工艺*, 2011, 40(17): 136-142.
- Wei Wei, Yao Yuan, Chen Ming, *et al.*. Research on the formation of welding and welding property of laser overlap welding for galvanized steel sheet for automotive body [J]. *Automobile Technology & Material*, 2009, (3): 14-18.
魏 伟, 姚 远, 陈 明, 等. 车身镀锌钢板激光搭接焊缝成形及焊接性能研究[J]. *汽车工艺与材料*, 2009, (3): 14-18.
- R Akhter, W M Steen. The gap model for welding zinc-coated steel sheet [C]. *Proc Int Conf Lasers Systems Application in Industry*, 1990. 219-236.

栏目编辑: 胡 冰