

车用镀锌钢板光纤激光拼焊工艺研究

李涛¹ 李芳¹ 王诗恩² 褚卫东² 王大明² 蔡艳¹

¹上海交通大学上海市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 镀锌拼焊板的应用,不仅可以提升汽车的防腐性能,而且可以在保持同等强度的条件下,减轻车体重量。激光焊接与其他焊接工艺相比,有焊缝窄、强度高、热影响区小等优点。但是,拼焊间隙会造成焊缝表面凹陷,焊缝强度不够。通过光纤激光拼焊,在获得较好的侧吹保护气体参数后,以正交实验的方式研究激光功率与焊接速度对焊缝成形的影响。通过宏观金相实验、拉伸实验与杯突实验等检测手段,对焊缝的形貌、力学性能与冲压成形性能进行检测。确定激光功率为3 kW,焊接速度为4 m/min是最佳工艺参数。在最佳工艺参数基础上,研究拼焊间隙大小对焊缝成形的影响。结果表明,当间隙不超过0.15 mm(约为板厚的11.1%)时,可以获得良好的焊缝。

关键词 激光技术;镀锌钢板;拼焊板;光纤激光焊接;间隙

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.011406

Research on Car Galvanized Tailor-Welded Blanks of Fiber Laser Welding

Li Tao¹ Li Fang¹ Wang Shien² Chu Weidong² Wang Daming² Cai Yan¹

¹Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

²Shanghai Tractor & Internal Combustion Engine Co., Ltd., Shanghai 200433, China

Abstract The application of galvanized steel tailor-welded blanks not only improves the corrosion resistance property of a car, but also reduces vehicle weight while the intensity maintains the same. Compared with other welding technologies, laser welding has lots of advantages, such as a narrow welding line, a high strength joint and a small heat-affected zone. However, the gap between the plates can cause surface depression and intensity deficiency. After obtaining suitable parameters of side-blown shielding gas, orthogonal experiment is designed to have a research on laser power and welding speed's influence on weld formation through tailored blank fiber laser welding. After that, metallurgical experiments, tensile tests and cupping tests are used to detect the performance, mechanical and deep stamping properties of the welding line. The result shows an optimum parameter when the laser power is 3 kW and the welding speed is 4 m/min. On the basis of optimal parameters obtained, a further study is made on gap's influence on weld formation. The result shows that a nice welding line can be obtained when the gap is not more than 0.15 mm (about 11.1% of the plate thickness).

Key words laser technique; galvanized steel; tailor-welded blanks; fiber laser welding; butt joint gap

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.3900; 060.3510

1 引言

激光拼焊技术因其多方面的优势,受到科学家与汽车企业的青睐。利用激光拼焊技术,不同材质、不同厚度,甚至不同涂层的板材均可以焊接在一起,形成理想的焊缝^[1-6]。然后,对拼焊好的板材进行冲压成形,

收稿日期: 2014-08-12; 收到修改稿日期: 2014-09-23; 网络出版日期: 2014-11-28

作者简介: 李涛(1989—),男,硕士研究生,主要从事汽车轻量化焊接方面的研究。E-mail: litaohn@sjtu.edu.cn

导师简介: 李芳(1978—),女,博士,助理研究员,主要从事焊接过程自动控制方面的研究。E-mail: lifang302@sjtu.edu.cn

(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

可以直接应用在汽车上制造^[7-8]。在汽车车身与零部件的生产中应用激光拼焊技术,既可以实现同等强度,又可以减轻汽车重量,同时,可以减少材料消耗和加工工序,在很大程度上提高企业生产效率,降低汽车的生产成本^[9-14]。此外,与电阻点焊和电弧焊相比,激光焊接的优点在于单位热输入量少、热变形小、焊缝深宽比大、焊接速度快、焊缝强度普遍高于母材、镀层锌的损耗低^[15]。

焊缝凹陷是激光拼焊时常见的缺陷之一。激光拼焊焊缝的凹陷与激光功率密度、焊接速度有很大关系,但是被焊接件的配合间隙是更为主要的影响因素^[16-17]。激光光斑尺寸很小,如果要同时落在两块板材的边缘处,就会由于过大的间隙将导致漏光及金属熔化量不足,造成焊缝表面凹陷,严重降低抗拉强度。因此,即使进行了精确装配,随着焊接的进行,拼焊的间隙也会逐渐加大,对焊接质量造成影响。

本文通过正交试验,对镀锌钢板进行激光拼焊,研究零拼焊间隙下焊接功率与焊接速度等因素对激光拼焊的影响,以及拼焊间隙对焊接质量的影响。

2 试验设备与方法

2.1 试验设备

试验采用的是 YLS-10000 光纤激光器、YW52 紧凑型激光头与数控机床。激光器最大输出功率为 10 kW,连续激光输出,输出波长为 1070 nm。传输光纤纤芯直径为 0.3 mm,准直镜焦距为 150 mm,聚焦镜焦距为 300 mm,焦斑直径为 0.6 mm。试验系统如图 1 所示。

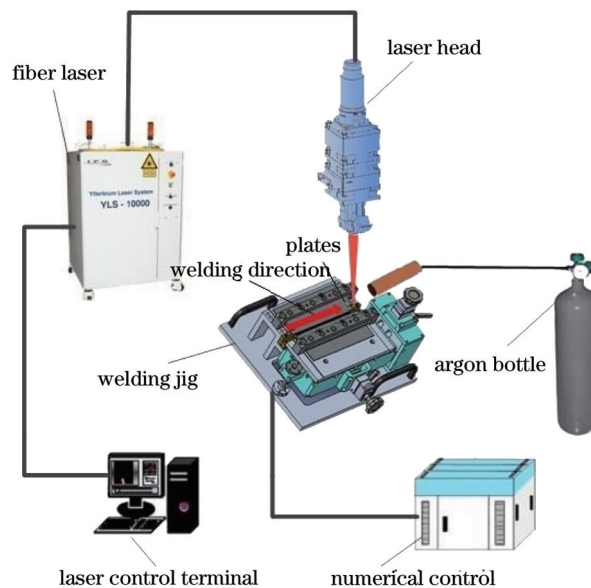


图 1 车用镀锌钢板光纤激光拼焊试验系统

Fig.1 Schematic of car galvanized tailor-welded blanks of fiber laser welding experimental setup

2.2 试验材料

试验材料牌号为 HC260LAD+Z100MB,此种钢板是冷轧热镀锌钢板,其主要化学成分如表 1 所示。材料的屈服强度在 260~330 MPa 范围内,属于高强度低合金钢,添加的 Ti、Nb 合金元素属于碳化物形成元素,能形成碳氮化合物粒子进行析出强化。同时,通过微合金元素的细化晶粒作用,得到较高的强度。材料的断后延伸率超过 26%,在汽车设计中,实际应用于车体板材。具有极好的塑性,当车体受到碰撞时,能够通过变形吸收极大的能量,对车内人员的安全起到非常大的作用。试验板材尺寸为 150 mm×60 mm×1.35 mm,进行 1.35 mm+1.35 mm 等厚拼焊。板材通过高精剪而成,切口光滑平整,有良好的直线度。焊接前用丙酮清洗焊接部位,去除油污。

表 1 HC260LAD+Z100MB 的材料化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of HC260LAD+Z100MB (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Ti	Nb
0.11	0.50	0.60	0.025	0.25	0.15	0.09

2.3 试验步骤

在零拼焊间隙的基础上,采用氩气进行侧吹保护,调整出一个比较合适的保护气体参数,如表2所示。调节激光功率与焊接速度进行正交试验,试验设计如表3所示。所有试验均保持离焦量为零。利用金相显微镜、万能拉伸试验机等仪器对焊缝进行检测,最终得到较理想的参数。在获得的参数基础上,改变拼焊间隙进行焊接试验,间隙设计为0.05、0.10、0.15、0.20、0.25 mm。对焊缝进行上述检测,得出拼焊间隙对车用镀锌钢板光纤激光拼焊的影响。

表2 保护气体参数

Table 2 Parameters of shielding gas

Gas category	Nozzle diameter /cm	Gas flow /(L/min)	Gas orientation	Side blow angle /($^{\circ}$)
Ar	1	20	Opposite with welding direction	45

表3 零间隙正交试验设计

Table 3 Orthogonal experiment design with zero butt joint gap

Experimental scheme	Laser power P /kW	Welding speed v /(m/min)
1	1	2
2	1	4
3	1	6
4	2	2
5	2	4
6	2	6
7	3	2
8	3	4
9	3	6

3 试验结果及分析

3.1 零拼焊间隙试验结果及分析

3.1.1 焊缝表面形貌

焊缝表面形貌如图2所示,得到的焊缝都比较均匀连续,无明显的裂纹、气孔等缺陷。由图2可知,在 $P=1$ kW, $v=4$ m/min时焊缝过窄。可以推断,在 $P=1$ kW, $v=6$ m/min时,焊缝会更窄,因而不进行该试验。从图2中还可以看出,随着焊接功率的增加,焊缝宽度增加;随着焊接速度的加快,焊缝宽度减小。

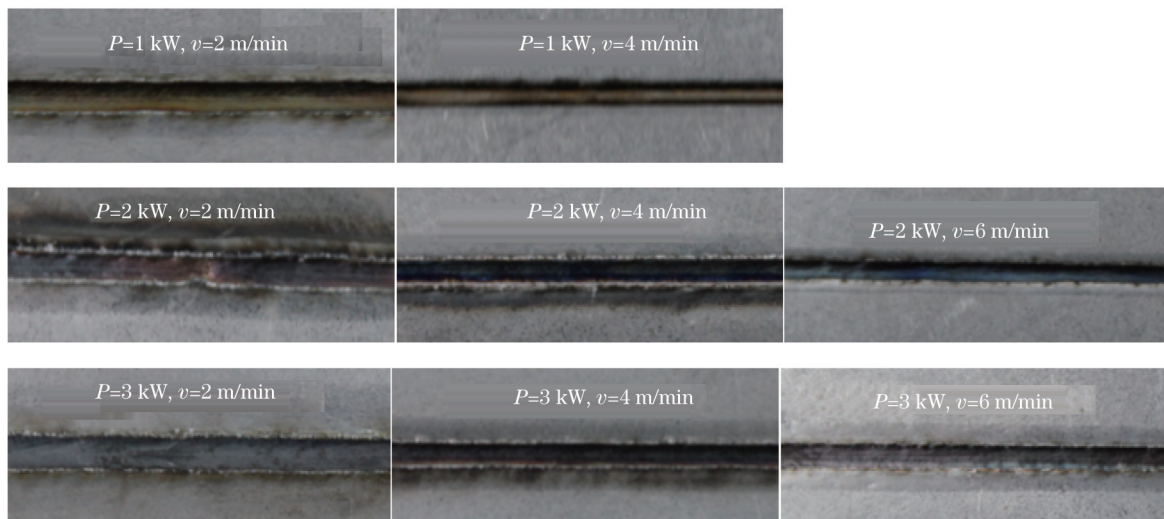


图2 零拼焊间隙焊缝表面形貌

Fig.2 Weld surface topography of zero butt joint gap

3.1.2 焊缝截面形貌

焊缝截面形貌如图3所示。从焊缝的截面结构来看,呈现上宽下窄的特点,这是因为在焊接过程中,材

料表层先吸收到较多的能量。对于图3(a)与图3(d),焊缝截面没有呈现比较理想的倒梯形,而是更倾向于倒三角形,这表明在焊接过程中,底层材料没有吸收到足够的能量,金属熔化不足,而且焊缝凹陷比较明显。对于图3(c)与图3(g),焊缝均有一定程度的凹陷。对于图3(e),焊缝截面呈典型的倒梯形,焊缝较饱满,但是,从图中可以看到明显的粗大柱状晶,而且热影响区很宽,说明热输入量过大。对于图3(b)与图3(f),呈现出较理想的焊缝。

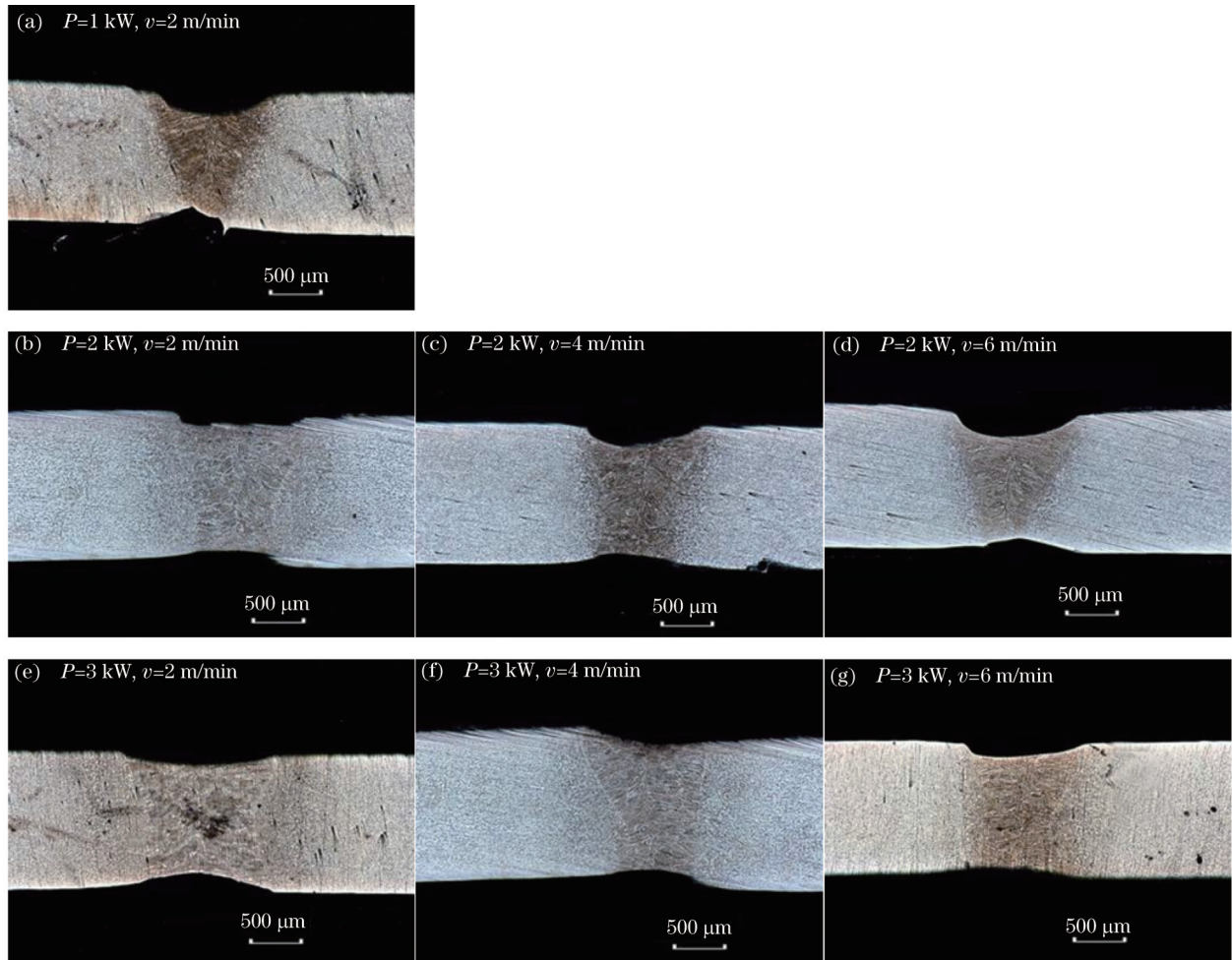


图3 零拼焊间隙焊缝截面形貌

Fig. 3 Cross section topography of zero butt joint gap

因此,可以认为 $P=3\text{ kW}$, $v=4\text{ m/min}$ 与 $P=2\text{ kW}$, $v=2\text{ m/min}$ 均为较优的工艺参数。

3.1.3 焊缝力学性能

1) 抗拉强度

经过宏观接头形貌观察后,再对 $P=1\text{ kW}$, $v=4\text{ m/min}$ 以外的其他参数焊缝进行拉伸试验,加载速度为 2 mm/min ,拉伸结果如表4所示,断裂位置均位于母材,如图4所示。表明这些参数下的激光拼焊焊缝抗拉强度均高于母材。从激光焊接的特点来讲,焊接过程中冷却速度快,在焊缝中会形成强度很高的马氏体,因此焊缝强度比母材高。

表4 零间隙拉伸结果

Table 4 Tensile results of zero butt joint gap

Experimental scheme	Laser power /kW	Welding speed /(m/min)	Tensile strength /MPa
1	1	2	376.3
4	2	2	380.8
5	2	4	376.2
6	2	6	376.1
7	3	2	374.0
8	3	4	375.3
9	3	6	376.1

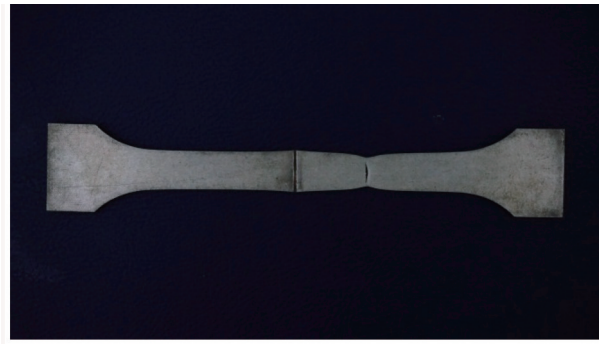


图4 拉伸断裂位置示意图

Fig.4 Sketch map of tensile fracture

2) 冲压性能

综合以上检测,选取了 $P=3\text{ kW}$, $v=4\text{ m/min}$ 和 $P=2\text{ kW}$, $v=2\text{ m/min}$ 这两个较优参数的试样,进行了杯突实验。焊缝杯突值如表5所示,与母材相比,两个参数下的杯突值均有一定程度的下降。但是,试样出现的第一条裂纹均贯穿母材与焊缝,且与焊缝垂直,如图5所示。这表明焊缝冲压性能符合要求。

表5 杯突试验结果

Table 5 Results of cupping test

Parameter	Cupping test value /mm
$P=2\text{ kW}$, $v=2\text{ m/min}$	9.66
$P=3\text{ kW}$, $v=4\text{ m/min}$	9.88
Base metal	11.56

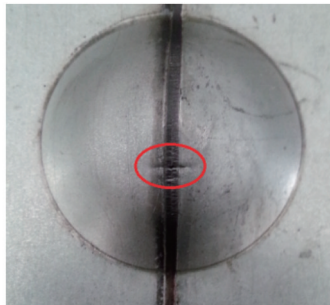


图5 杯突试验结果示意图

Fig.5 Diagram of cupping test result

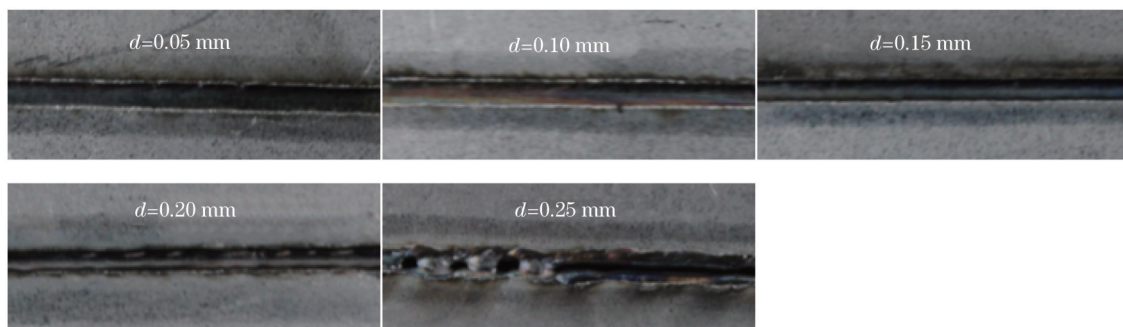
因此,在 $P=3\text{ kW}$, $v=4\text{ m/min}$ 时,所形成焊缝形貌良好,接头强度高且冲压性能好,可认为是最佳工艺参数。

3.2 不同拼焊间隙试验结果及分析

在 $P=3\text{ kW}$, $v=4\text{ m/min}$ 这一最佳工艺参数下,调整拼焊间隙的大小在 $0.05\sim 0.25\text{ mm}$ 之间进行实验。

3.2.1 焊缝表面形貌

焊缝表面形貌如图6所示,从图6可以看出,随着拼焊间隙的增大,焊缝宽度逐渐变窄。在间隙增大的

图6 不同拼焊间隙焊缝表面形貌($P=3\text{ kW}$, $v=4\text{ m/min}$)Fig.6 Weld topography of different butt joint gaps ($P=3\text{ kW}$, $v=4\text{ m/min}$)

过程中,焊缝从理想形貌,发展到呈现断断续续的状态。在间隙为 0.25 mm 时,焊缝出现明显的断续现象,不符合要求。然后对于其他间隙的焊缝,进行进一步的检测。

3.2.2 焊缝截面形貌

焊缝截面形貌如图 7 所示,从图 7 可以看出,随着拼焊间隙的增大,焊缝凹陷越来越大。从理论上讲,其余参数不变,增大间隙会导致凹陷更明显。这是因为间隙增大后,熔化的液态金属需要向下凹陷使曲率半径减小,增大表面张力以与重力平衡。凹陷变大会导致板厚方向连接宽度减小。

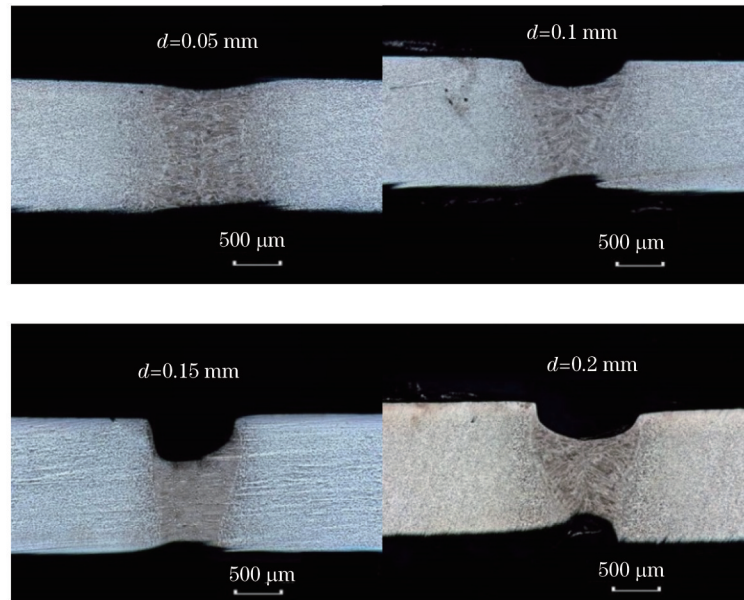


图 7 不同拼焊间隙焊缝截面形貌

Fig.7 Cross section topography of different butt joint gaps

3.2.3 焊缝力学性能

1) 抗拉强度

对于拼焊间隙为 0~0.20 mm 之间的焊缝,进行了拉伸试验,拉伸结果如表 6 所示,断裂位置均位于母材区。结果表明,该间隙范围内的焊缝强度均强于母材。经过显微维氏硬度检测,焊缝硬度较母材有了很大程度的提升,这也意味着抗拉强度的提升。因此,虽然从焊缝截面看来有一定程度的凹陷,截面积减小,但是焊缝最大抗拉力要高于母材区。

表 6 不同拼焊间隙下的拉伸结果

Table 6 Tensile results of different butt joint gaps

Gap /mm	Tensile strength /MPa
0.05	379.4
0.10	378.3
0.15	380.0
0.20	377.5

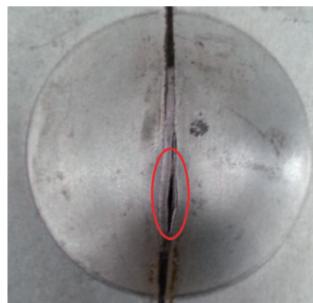


图 8 杯突试验结果示意图(间隙为 0.20 mm)

Fig.8 Result of cupping test (gap is 0.20 mm)

2) 冲压性能

对于拼焊间隙为 0.05~0.20 mm 之间的焊缝,进行了杯突试验,试验结果如表 7 所示。随着间隙的增大,杯突值有所下降。这表明间隙越大,焊缝的冲压性能越差。而且,间隙为 0.05、0.10、0.15 mm 时,出现的第一条裂纹贯穿焊缝与母材,并与母材垂直,表明焊缝冲压性能符合要求。当间隙为 0.20 mm 时,第一条裂纹直接出现在焊缝上,如图 8 所示。因此,当间隙达到 0.20 mm 时,焊缝冲压性能不符合要求。

表 7 不同拼焊间隙杯突试验结果

Gap /mm	Cupping test value /mm
0.05	11.00
0.10	9.66
0.15	8.57
0.20	7.79

4 结 论

对 HC260LAD+Z100MB 车用镀锌钢板进行光纤激光拼焊,得到了如下结论:

1) 针对激光功率与焊接速度进行正交试验,结果表明,功率为 3 kW,焊接速度为 4 m/min 时为最佳工艺参数。

2) 在最佳工艺参数基础上,调整拼焊间隙的大小进行研究。结果表明,当拼焊间隙不超过 0.15 mm(约为板厚的 11.1%,激光光斑直径的 25.0%)时,能形成符合强度与深冲性能要求的焊缝;当间隙达到 0.20 mm(约为板厚的 14.8%,激光光斑直径的 33.3%)时,能形成符合强度要求的焊缝,但深冲性能不符合要求;当间隙达到 0.25 mm(约为板厚的 18.5%,激光光斑直径的 41.7%)时,不能形成完整的焊缝。

参 考 文 献

- 1 Pallett R J, Lark R J. The use of tailored blanks in the manufacture of construction components[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 117(1): 249-254.
- 2 Li Bin, Guo Xiaoyan, Lu Hongzhou. Research on process and application of laser tailor welded blanks in automobile manufacturers [J]. *Laser Journal*, 2012, 33(1): 59-60.
李 斌, 郭小燕, 路洪洲. 激光拼焊板在汽车制造中的应用及相关工艺研究[J]. *激光杂志*, 2012, 33(1): 59-60.
- 3 Zhu Jiufa. Present status and prospects of tailor welded blanks for automobiles [J]. *Wuhan Iron and Steel Corporation Technology*, 2011, 49(3): 53-56.
朱久发. 激光拼焊汽车板的应用现状与发展前景[J]. *武钢技术*, 2011, 49(3): 53-56.
- 4 Zhao Huaibei, Cai Chengzheng, Shu Jie, *et al.*. Laser tailor welding for production of car body [J]. *Modern Components*, 2010, (3): 56-58.
赵淮北, 蔡成征, 舒 洁, 等. 车身制造中的激光拼焊技术[J]. *现代零部件*, 2010, (3): 56-58.
- 5 Lin Hui, Shi Lei. Application of laser tailor welded blanks at car body [J]. *Machinery*, 2010, (8): 66-68.
林 辉, 施 磊. 浅谈激光拼焊板在汽车车身上的应用[J]. *机械制造*, 2010, (8): 66-68.
- 6 Wu Qiang, Chen Genyu, Xu Lanying, *et al.*. CO₂ laser welding of vehicle body [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(12): 1726-1731.
伍 强, 陈根余, 徐兰英, 等. CO₂激光焊接车身拼焊板[J]. *中国激光*, 2007, 34(12): 1726-1731.
- 7 Veera Babu K, Ganesh Narayanan R, Saravana Kumar G. An expert system for predicting the deep drawing behavior of tailor welded blanks[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(12): 7802-7812.
- 8 Dhumal A T, Narayanan R G, Kumar G S. Simulation based expert system to predict the deep drawing behaviour of tailor welded blanks [J]. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2012, 15(3): 164-172.
- 9 Abbasi M, Ketabchi M, Ramazani A, *et al.*. Investigation into the effects of weld zone and geometric discontinuity on the formability reduction of tailor welded blanks [J]. *Computational Materials Science*, 2012, 59: 158-164.
- 10 Zadpoor A A, Sinke J, Benedictus R. Mechanics of tailor welded blanks: An overview[J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 344: 373-382.

- 11 Ono M, Yoshitake A, Omura M. Laser weldability of high-strength steel sheets in fabrication of tailor welded blanks [J]. *Welding International*, 2004, 18(10): 777-784.
- 12 Forsman T. Laser welding of tailored blanks [C]. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2002)*, 2002. 7-18.
- 13 Riahi M, Amini A. Effect of different combinations of tailor-welded blank coupled with change in weld location on mechanical properties by laser welding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(5-8): 1937-1945.
- 14 Cao Wenjie, Jia YiChao, Xu Anping, *et al.*. Optimization of welding parameters of laser tailor welded blanks [J]. *Welding Technology*, 2011, 40(7): 33-36.
曹文杰, 贾毅超, 徐安平, 等. 激光拼焊板焊接工艺参数的优化[J]. *焊接技术*, 2011, 40(7): 33-36.
- 15 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.
- 16 Zhang Fan, Li Fang, Wang Shien, *et al.*. Research of lap gap in fiber laser lap welding of galvanized steel [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1003011.
张帆, 李芳, 王诗恩, 等. 镀锌钢板搭接光纤激光焊接中搭接间隙的研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1003011.
- 17 Chen Dong, Zhao Mingyang, Zhu Tianxu, *et al.*. Research on effects of gap on weld quality of unequal-thickness blanks tailored laser welding and its compensation method [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(12): 1489-1493.
陈东, 赵明扬, 朱天旭, 等. 间隙对不等厚板激光拼焊焊缝质量的影响及其补偿方法研究[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(12): 1489-1493.

栏目编辑: 史敏