

文章编号: 0258-7025(2007)12-1726-06

CO₂ 激光焊接车身拼焊板

伍 强^{1,2}, 陈根余², 徐兰英³, 龚金科², 李力钧²

¹ 广东技术师范学院机电系, 广东 广州 510635

² 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082

³ 华南理工大学机械工程学院, 广东 广州 510640

摘要 利用 CO₂ 激光对汽车车身拼焊板进行了焊接实验, 并对焊缝进行了显微组织分析和机械性能分析。采用 Ar 气作为焊接保护气体, 能获得比采用 N₂ 气时更好的深冲性能; 侧吹保护气体的方法能有效地控制焊缝中的锌含量。研究了焊接熔深和焊缝宽度随激光功率和焊接速度变化的规律。实验结果表明, 在优化的工艺参数下, 激光焊接车身拼焊板的焊缝中没有出现气孔、裂纹和热影响区 (HAZ) 软化等缺陷, 拼焊板的深冲性能优良; 拼焊板的成形性能取决于两种材料的强度比和厚度比, 焊缝易于向高强度镀锌钢板一侧偏移; 普通钢板越薄, 焊缝的偏移量越大。

关键词 激光技术; 激光焊接; 薄钢板; 焊接工艺; 锌行为

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A

CO₂ Laser Welding of Vehicle Body

WU Qiang^{1,2}, CHEN Gen-yu², XU Lan-ying³, GONG Jin-ke², LI Li-jun²

¹ Department of Mechanical and Electrical Engineering,

Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou, Guangdong 510635, China

² State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body,

Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

³ College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

Abstract Based on experiments of CO₂ laser welding to vehicle body, joint microstructure and mechanical property of specimen are analyzed. The deep punching performance of laser welding adopting Ar as protective gas is better than that acquired by adopting N₂. Meanwhile the percentage of zinc in welding seam can be effectively controlled by the side protective gas blowing. Welding depth and width varying with laser power and speed of welding were also investigated. The result indicates that it does not appear some flaws, such as gas hole, crack and softening of heat affect zone (HAZ) in laser welding seam of tailor-welded blanks through optimizing technology parameters. The deep punching performance of tailor-welded blanks is of very high quality. Forming property of tailor-welded board depends on strength ratio and thickness ratio of two materials, welding line mainly locates at high strength galvanized steel sheet, the offset of welding line tends toward thin general steel.

Key words laser technique; laser welding; sheet steel; welding technology; effects of zinc evaporation

1 引 言

近年来,安全、减重和环保作为汽车产业的重要问题已越来越受到人们的重视。在不增加成本,维持车身功能与抗冲击安全性的情况下,采用新材料以及新的成形方法成为减轻车身质量的重要手段^[1,2]。高强度镀锌钢是解决上述问题的一种优选

材料。拼焊已经成为汽车车身的成形新技术,它可以不受限制地把不同厚度、不同材质、不同强度、不同冲压性能和不同表面状况的散板坯拼焊在一起,用来压制成大型覆盖件。采用这种拼焊板坯既可设计出强度合理、由一件取代数件的车身结构件,又可减少结构质量、降低车身重量,并减少零件制造及焊

收稿日期:2007-06-05; 收到修改稿日期:2007-09-18

基金项目:国家自然科学基金(50575070)资助项目。

作者简介:伍 强(1967—),男,湖北人,讲师,主要从事汽车车身先进制造技术研究。E-mail:wuqiang20008@163.com

装工作量,达到降低成本的目的。

激光焊与电阻焊及各种气体保护焊相比,其突出优点是光束狭窄,能量高、速度快、热影响区小及焊缝品质好,更能满足拼焊品质的要求^[3,4]。本文采用自制的1500 W连续 CO₂ 激光器对汽车车身薄板进行了大量的工艺实验,获得了较好的焊接效果。

2 实验条件与方法

2.1 激光焊接的设备

所用激光器为自制的 PHC-1500 折叠式准封离型 CO₂ 激光器,硒化锌透镜聚焦,连续输出的模式为 TEM₀₁。激光参数见表 1。实验采用自制的焊接夹具固定工件,保证工件的焊缝均匀平整,工件间隙被控制在 0.10~0.15 mm 以内。

表 1 激光参数

Table 1 Laser parameters

Focus /mm	Divergent half -angle /mrad	Focal depth /mm	Beam diameter before focusing /mm
127	1	3	28

表 2 焊接薄板编号及厚度

Table 2 Number and thickness of welding sheet

Numbering	M1	M2	M3	M4
Type of material	High strength galvanized steel	General steel	General steel	General steel
Thickness <i>d</i> /mm	1.5	1.0	1.5	2.0

表 3 材料的化学成分(质量分数)

Table 3 Chemical constitution of material (mass fraction)

Numbering	C≤	Si≤	Mn≤	P≤	Cr≤	S≤	Ti≤
M1	0.18	0.5	2.0	0.025	0.8	0.015	—
M2~M4	0.01	—	0.4	0.025	—	0.020	0.2

表 4 材料的力学性能

Table 4 Mechanical property of material

Numbering	Yield strength /MPa	Strength of extension /MPa	Extensibility after breakage /%
M1	500~650	800~900	10
M2~M4	120~210	260	44

2.2 实验材料

实验材料为瑞典生产的 1.5 mm 厚的高强度镀

锌钢板(DOGAL 800DP)和宝钢生产的冷轧板(BUSD);冷轧板的厚度分别为 1.0 mm, 1.5 mm 和 2.0 mm,高强度镀锌钢的镀锌量为 140 g/m²。实验材料的编号、化学成分和力学性能如表 2~4 所示。高强度镀锌钢的母材金相组织是铁素体+珠光体。冷轧板母材的金相组织是铁素体,如图 1 所示。工件尺寸为 100 mm×30 mm。

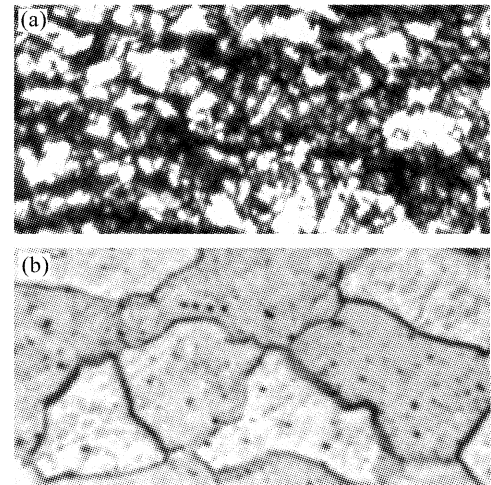


图 1 材料的金相组织(500×)

(a) 高强度镀锌钢;(b) 冷轧钢

Fig. 1 Metallurgical structure of material

(a) high strength galvanized steel; (b) general steel

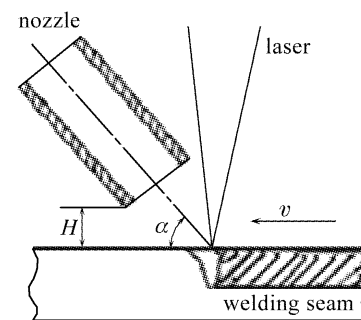


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

2.3 实验方法

实验装置如图 2 所示,对接焊接方式。针对锌的影响,以及激光焊接的薄板还要适合于后续的深冲加工工艺,实验采用侧吹保护气体的方法把锌的影响减小到最低限度,同时也在一定程度上抑制了铁的等离子体的形成^[5]。为了减少焊接缺陷,焊前用丙酮清洗焊接部位,并保持环境干燥。

首先对高强度镀锌钢板进行焊接实验,然后用 1.5 mm 厚的高强度镀锌钢分别与 1 mm, 1.5 mm 和 2.0 mm 厚的冷轧钢板进行拼焊。激光焊接时,焦点位于薄试样板上表面的接缝处,激光光束相对试样

表面的法线向薄板一侧倾斜 5° 以保护镜片,侧吹喷嘴离工件上表面的高度 H 为 2 mm,试件随工作台移动。焊后沿垂直于焊缝方向切割焊接工件,抛光后经酸腐蚀,用金相显微镜检测焊缝质量;同时在万能实验机上对焊接试件进行机械性能分析。实验研究了多种工艺参数下的激光焊缝显微结构和硬度分布,以优化激光焊接工艺。

3 结果与讨论

3.1 保护气体种类比较

焊接保护气体的主要作用是防止焊接过程中工件表面的氧化,以及去除高功率深熔焊接过程中产生的对激光能量有吸收和散射作用的等离子体云。当等离子体浓度不太高时,选择合适的保护气体对抑制等离子体具有一定效果。当分别使用 N_2 和 Ar 气作为侧吹辅助气体进行焊接时,发现其最大熔深并无多大区别,但是接头的硬度、韧性和焊接件的杯突值却有比较大的差异。实验表明,采用 N_2 气作为保护气体,接头的硬度偏高,韧性下降。

从表 5 列出的两种气体焊接高强度镀锌钢后的杯突值来看,选用 N_2 气作为辅助气体时,焊接件的杯突值只相当于母材的 78%;如果采用 Ar 气作为保护气体,则可达 97%。这是由于 N_2 气在高温熔池中与金属材料发生冶金反应,影响焊缝的性能所致^[6]。因此,为保证车身拼焊板良好的深冲性能,焊接时选择 Ar 气作为焊接保护气体为宜。

表 5 焊接试件的杯突值

Table 5 Erichsen number of welds

Protective gas	Number of material	Type of grease lubricant	Erichsen number IE /mm
N_2	M1~M1	Graphite grease	8.2
Ar	M1~M1	Graphite grease	10.2
—	M1	Graphite grease	10.5

3.2 激光功率与焊缝的深度和宽度的关系

实验工艺参数如下:离焦量为 -0.4 mm,同轴保护气体(Ar 气)流量为 2.5 m^3/h ,侧吹保护气体(Ar 气)流量为 1.8 m^3/h ,侧吹角度在 30° 左右。

3.2.1 等厚钢板的激光拼焊

将 1.5 mm 厚的高强度镀锌钢和 1.5 mm 厚的冷轧板对接装夹在夹具上进行激光等厚拼焊。

当焊接速度为 1.0 m/min 时得到激光功率与熔深和熔宽的关系曲线,如图 3 所示;固定激光功率

为 1300 W,得到焊接速度与熔深和熔宽的关系曲线,如图 4 所示。可以看出,随着激光功率的增大或焊接速度的减小,焊接熔深逐渐增大,焊缝宽度也随之加大。

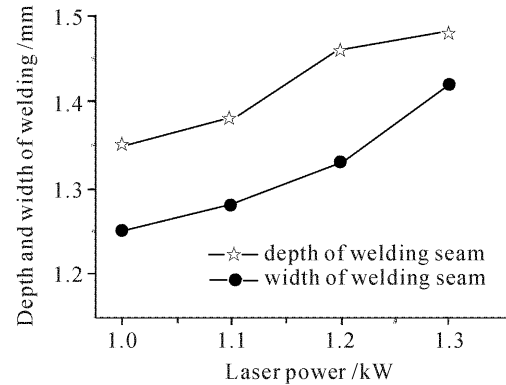


图 3 等厚钢板激光拼焊时激光功率与熔深和熔宽的关系曲线

Fig. 3 Curve of laser power and depth/width

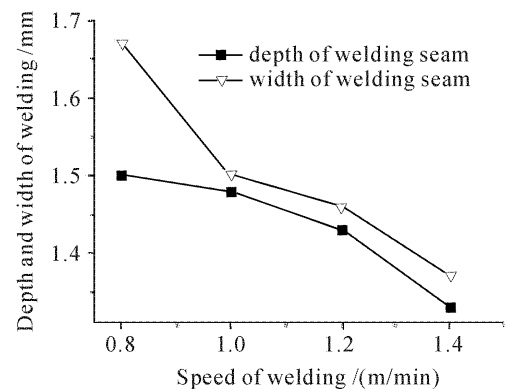


图 4 等厚钢板激光拼焊时焊接速度与熔深和熔宽的关系曲线

Fig. 4 Curve of welding speed of welding and depth/width

3.2.2 差厚钢板的激光拼焊

将 1.5 mm 厚的高强度镀锌钢分别与 1.0 mm 和 2.0 mm 厚的冷轧钢板对接装夹在夹具上进行激光差厚拼焊实验,并保证下表面平齐。

激光拼焊对焊接材料的边部质量要求很高^[7],由于板材的厚度不同,在夹具上装夹工件时应注意焊缝间隙均匀,表面平整,误差均不得超过 0.10 mm。为了避免薄板获得的能量过大而变形或过烧而影响焊接强度,激光焊接差厚拼焊板时,激光束应偏离焊缝中心靠近厚板一侧。

图 5 是当焊接速度为 1.1 m/min 时,高强度镀锌钢与 1.0 mm 厚普通钢板拼焊的激光功率与熔深和熔宽的关系曲线图。固定激光功率为 1000 W,得到高强度镀锌钢与 1.0 mm 厚普通钢板拼焊时,焊接

速度与熔深和熔宽的关系曲线图,如图 6 所示。

当焊接速度为 1.0 m/min 时,得到高强度镀锌钢与 2.0 mm 厚普通钢板拼焊的激光功率与熔深和熔宽的关系曲线图,如图 7 所示。固定激光功率为 1400 W,得到高强度镀锌钢与 2.0 mm 厚普通钢板拼焊的焊接速度与熔深和熔宽的关系曲线图,如图

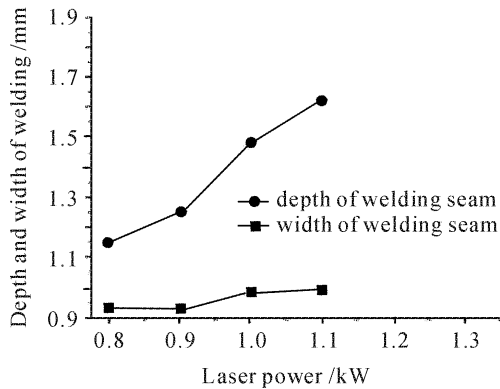


图 5 与 1.0 mm 厚普通钢板拼焊时激光功率与熔深和熔宽的关系曲线

Fig. 5 Curve of laser power and welding depth/width

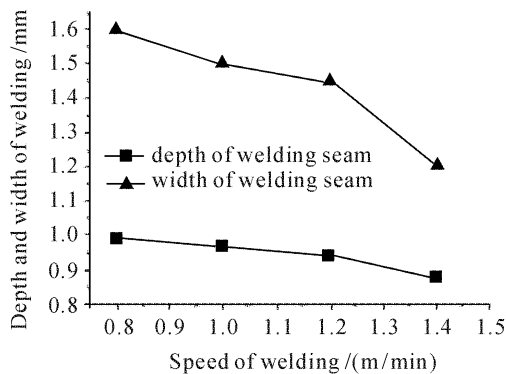


图 6 与 1.0 mm 厚普通钢板拼焊时焊接速度与熔深和熔宽的关系曲线

Fig. 6 Curve of welding speed and welding depth/width

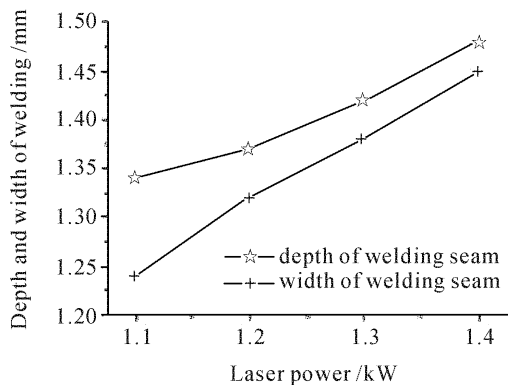


图 7 与 2.0 mm 厚普通钢板拼焊时激光功率与熔深和熔宽的关系曲线

Fig. 7 Curve of laser power and welding depth/width

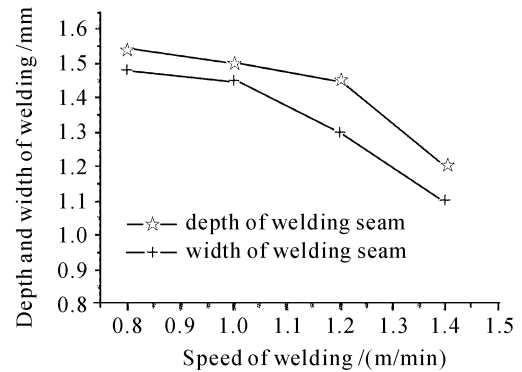


图 8 与 2.0 mm 厚普通钢板拼焊时焊接速度与熔深和熔宽的关系曲线

Fig. 8 Curve of welding speed and welding depth/width

8 所示。可以看出,激光功率或焊接速度改变时,焊接熔深和熔宽的变化趋势与等厚拼焊板的变化规律一致。

3.3 焊缝质量的检测与分析

3.3.1 锌行为的研究

锌不稳定的急剧气化增加了蒸气的压力和紊流度,对熔池有强烈的搅拌作用,使扩展到金属表面上方的等离子体云的波动加剧,导致激光焊接高强度镀锌钢时飞溅火花和多孔性的倾向加大,扩大了热作用区和降低了焊接稳定性,出现内应力、裂纹和气孔等缺陷,从而影响焊接件的焊缝质量,而且加大了聚焦镜的保护难度^[2]。为此,在镀锌钢板的大功率激光焊接中,通常采用对焊缝侧吹保护气的方法以抑制等离子体的形成^[8]。

应用能谱仪(EDS)对焊接接头进行能谱分析。结果表明,1.0 mm 冷轧板与 1.5 mm 高强度镀锌钢拼焊焊缝中,锌的摩尔分数仅 1.31%;1.5 mm 冷轧板与 1.5 mm 高强度镀锌钢拼焊焊缝中,锌的摩尔分数只有 4.37%;而 2.0 mm 冷轧板与 1.5 mm 高强度镀锌钢拼焊焊缝中,几乎不含锌。说明采用侧吹保护气体进行控制后,虽然存在气化后的锌进入熔池,但含量很少,没有出现气孔现象。差厚拼焊板的焊缝比等厚拼焊板的锌含量少。这是因为差厚拼焊板焊接时,由于焊缝两侧材料的上表面的高度差,有利于锌蒸气的排出所致。

3.3.2 焊接接头的显微组织分析

利用 MM-6 卧式金相显微镜对焊接接头进行显微组织分析。图 9 为激光拼焊接头的显微组织。可以看出,高强度镀锌钢一侧的热影响区的金相组织是上贝氏体+低碳马氏体+铁素体;冷轧钢板一侧的热影响区转变成了比母材组织细小的铁素体。

但是,在激光深熔焊接过程中,材料剧烈气化膨胀产生的压力将熔融材料抛出,形成小孔,这时液相金属产生快速的对流混合作用,因此,尽管拼焊板两边的材料不同,但是焊缝区具有相同的金相组织,即上贝

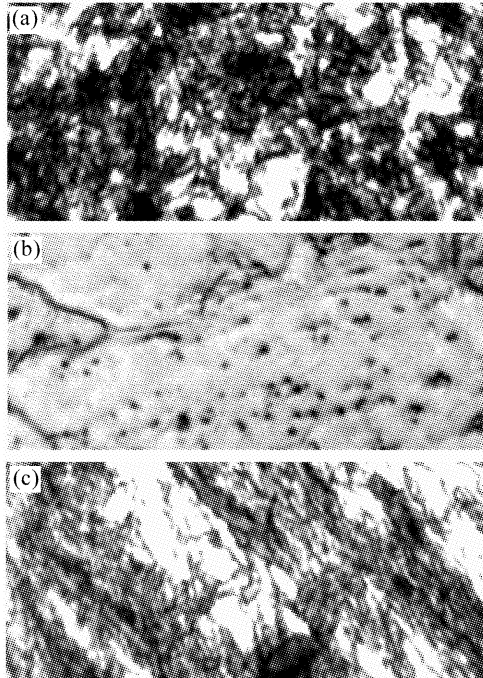


图9 拼焊焊缝组织的金相图(500×)

(a) 熔池区;(b) 冷轧钢板热影响;(c) 高强度镀锌钢板热影响
Fig. 9 Metallurgical structure of tailor-welding seam
(a) fused bath zone; (b) heat-affected zone of general steel;
(c) heat-affected zone of high strength galvanized steel sheet

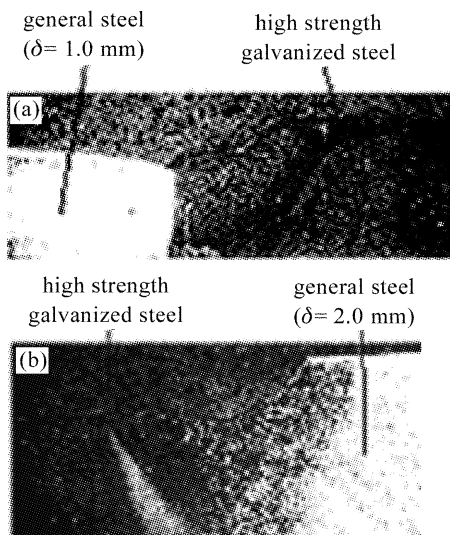


图10 拼焊接头的焊缝全貌

(a) 高强度镀锌钢与1.0 mm厚普通钢拼焊;
(b) 高强度镀锌钢与2.0 mm厚普通钢拼焊

Fig. 10 General view of welding seam in welding joint
(a) welding of high strength galvanized steel sheet and general steel with thickness of 1.0 mm; (b) welding of high strength galvanized steel sheet and general steel with thickness of 2.0 mm

氏体+低碳马氏体,而且比热影响区的晶粒更加细小。焊缝的金相组织细小,甚至出现少量的马氏体,这是由激光焊接薄板时极快的冷却速度导致的。

实验表明,差厚板的拼焊焊缝一面平整,另一面高低过渡圆滑,焊缝和热影响区宽度均匀,焊缝表面质量高,如图10所示。

3.3.3 焊接接头的拉伸实验

在WDW-100微机控制电子万能实验机上,对焊接接头进行了拉伸实验。如表6所示。与表4比较,可以看出,高强度镀锌钢的激光焊接接头的强度与母材大体相当;拼焊接头的抗拉强度 σ_b 和屈服强度 σ_s 均高于冷轧钢板的相应值。

表6 拼焊板的力学性能

Table 6 Mechanical property of tailor-welding sheet

Number of tailor-welded sheet	σ_b /MPa	σ_s /MPa
M2~M1	325.7	244.3
M3~M1	322.9	246.9
M4~M1	353.2	264.7

拉伸实验发现,拼焊试件全部断裂在冷轧钢板这边,并远离焊缝。这说明拼焊件焊缝的强度高于拼焊板中强度较低的冷轧钢。这是由于激光焊接冷却速度快,焊缝硬度较母材提高幅度大,平均硬度达到415HV,约为高强度镀锌钢(270HV)的1.5倍,导致焊缝横向变形很小,使焊缝强度高于母材强度,且焊缝强度几乎不受厚度差引起的应力集中的影响,没有出现热影响区软化现象。

3.3.4 焊接接头的杯突实验

在BT6型杯突实验机上进行杯突实验,材料规格为100 mm×100 mm。实验采用端部为球形的冲头,球头半径为20 mm,石墨润滑脂作为润滑材料,对着焊缝将夹紧的试样压入压模内,直至出现穿透裂缝为止,所测量的杯突深度即为实验结果。实验结果如表7所示。从表中可以看出,等厚拼焊板的杯突值比母材下降了20%,不等厚拼焊板的杯突值

表7 激光焊缝杯突实验

Table 7 Cupping test of welding joint

Number	Thickness d /mm	Average erichsen number IE/mm
M2~M1	1.0/1.5	8.5
M3~M1	1.5/1.5	7.7
M4~M1	2.0/1.5	6.8
M1	2.0	10.5

比母材降低了 28%; 1.5 mm 厚的高强度镀锌钢与 1.0 mm 厚的冷轧钢板拼焊的杯突值最大, 深冲性能最优。焊缝较母材硬度大幅度提高的结果是塑性性能下降, 影响材料冲压成形的性能。

由于是异种材料的激光拼焊接头, 杯突试件焊缝两边的变形不均匀, 焊缝均向高强度镀锌钢板一侧发生偏移, 而且普通钢板越薄, 焊缝的偏移量越大。如图 11 所示, 1.0 mm 厚普通钢板与 1.5 mm 厚高强度镀锌钢板的拼焊焊缝最大偏移量达到 3.2 mm; 2.0 mm 厚普通钢板与 1.5 mm 厚高强度镀锌钢板的拼焊焊缝, 由于普通钢板比高强度镀锌钢板厚, 焊缝偏移量为 1.2 mm, 在这三种焊缝偏移量中最小; 三种焊缝均比母材的杯突值小, 其结果是焊接接头的塑性性能比母材低, 影响材料冲压成形的性能。

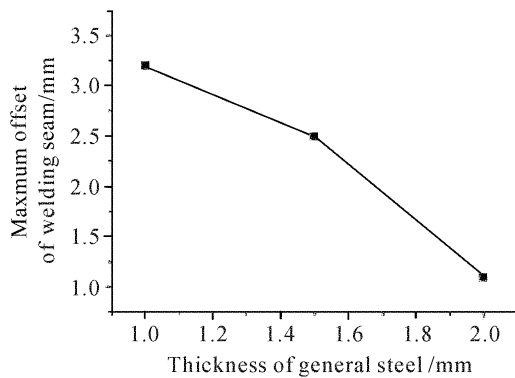


图 11 焊缝偏移量

Fig. 11 Offset of welding seam

4 结 论

1) 激光焊接车身薄板的实验表明, 作为焊接保护气体的 Ar 同 N₂ 比较起来, 采用 Ar 气保护的焊接试件的深冲性能更好。

2) 研究了激光功率、焊接速度与焊缝熔深、熔宽的关系。采用侧吹保护气体能有效地控制锌蒸气对焊缝的影响, 没有出现气孔、裂纹和热影响区软化等缺陷, 焊接接头的力学性能优良; 热影响区细小、焊缝均匀, 拼焊焊缝的强度高于普通钢板。

3) 拼焊板的成形性能取决于两种材料的强度比和厚度比, 焊缝易于向高强度镀锌钢板一侧偏移; 普通钢板越薄, 焊缝偏移量越大, 1.0 mm 厚普通钢板与 1.5 mm 厚高强度镀锌钢板的拼焊焊缝最大偏移量达到 3.2 mm。因此, 合理地选用拼焊材料, 可以使拼焊板冲压零件的变形保持均匀, 使焊缝偏移最小。

参 考 文 献

- Tian Haobin, Lin Jianping, Liu Ruitong *et al.*. A review on ultralight auto body and related forming technologies [J]. *Automotive Engineering*, 2005, **27**(3):381~384
田浩彬, 林建平, 刘瑞同等. 汽车车身轻量化及其相关成形技术综述[J]. *汽车工程*, 2005, **27**(3):381~384
- Wu Qiang, Chen Genyu, Wang Gui *et al.*. CO₂ laser welding of zinc coated high strength steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1133~1138
伍 强, 陈根余, 王 贵等. 高强度镀锌钢的 CO₂ 激光焊接[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1133~1138
- Wu Jun, Li Liang. Laser welding and its application to the automobile manufacturing overseas [J]. *J. Wuhan Automotive Polytechnic University*, 2000, **22**(6):33~36
吴 军, 李 亮. 激光焊及其在国外汽车生产上的应用[J]. *武汉汽车工业大学学报*, 2000, **22**(6):33~36
- Wang Hailin, 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
- Tang Xiahui, Zhu Haihong, Zhu Guofu *et al.*. Study of plasma control in high-power CO₂ laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(2):174~178
唐霞辉, 朱海红, 朱国富等. 高功率 CO₂ 激光焊接等离子体控制实验研究[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(2):174~178
- Tang Xiahui, Zhu Haihong, Zhu Guofu *et al.*. Laser-induced plasma absorption and control for CO₂ laser deep-penetration welding [J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, **11**(7):741~744
唐霞辉, 朱海红, 朱国富等. CO₂ 激光深熔焊接光致等离子体吸收及其控制[J]. *中国机械工程*, 2000, **11**(7):741~744
- Yan Qi, Cao Neng, Yu Ningfeng. Experimental study on formability of blanks after laser welding [J]. *Applied Laser*, 2003, **23**(2):71~73
阎 启, 曹 能, 俞宁峰. 激光拼焊板成形性能的试验研究[J]. *应用激光*, 2003, **23**(2):71~73
- Cui Huaiyang, Chen Kai, Zuo Tiechuan. CO₂ laser-weld ability of galvanized steel sheets [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, **25**(4):115~119
崔怀洋, 陈 铠, 左铁钊. 镀锌板的 CO₂ 激光焊接性[J]. *焊接学报*, 2004, **25**(4):115~119