

镀锌钢板的光纤耦合半导体激光焊接性能

徐国建¹ 钟立明^{1*} 杭争翔¹ 林久胜² 傅新皓³ 武斌斌³

¹沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870

²沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870

³鞍山煜宸科技有限公司, 辽宁 鞍山 114044

摘要 采用光纤耦合半导体激光器(LDF4000-40)组成的焊接系统,研究了其在汽车制造领域对不等厚(厚度 $t=0.7/1.4$ mm)镀锌钢板的焊接性能。试验结果表明,与CO₂激光焊接相比,光纤耦合半导体激光焊接过程更加稳定,焊缝成型美观且更易控制,焊接速度得到大幅提高;镀锌钢板焊接接头的拉伸强度和延伸率满足汽车行业的标准要求,且断裂位置在母材上;镀锌钢板焊缝金属由铁素体和部分珠光体组成,焊缝金属硬度相比于母材提高50%;在同等激光输出功率条件下,光纤耦合半导体激光与CO₂激光比较,其焊接速度提高1.2倍以上。

关键词 激光技术; 光纤耦合半导体激光; 镀锌钢板; 薄板焊接; 焊接性能; CO₂激光

中图分类号 TG456.7 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.071402

Welding Performances of Galvanized Sheet Using the Fiber Coupled Diode Laser

Xu Guojian¹ Zhong Liming¹ Hang Zhengxiang¹ Lin Jiusheng² Fu Xinhao³ Wu Binbin³

¹School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology,

Shenyang, Liaoning 110870, China

²School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China

³Anshan Raycham Technology Co.,Ltd., Anshan, Liaoning 114044, China

Abstract The paper adopts the fiber coupled diode laser welding system of LDF4000-40 and studies the welding performances of galvanized sheet with different thicknesses ($t=0.7/1.4$ mm) in the automobile industry. The results show that compared with the CO₂ laser welding, it has better process stability, better welding bead with easier control, and faster welding speed. The tensile strength and elongation of the galvanized sheet welded joints meet the standard requirements of the motor industry and the cracks generate in the base metal parts. The galvanized steel weld metal includes ferrite and pearlite, so that the weld metal is 1.5 times the hardness of the base metal. Under the same condition of laser output power, the welding speed of fiber coupled diode laser increased more than 1.2 times compared with that of the CO₂ laser.

Key words laser technique; fiber coupled diode laser; galvanized sheet; thin sheet welding; welding performances; CO₂ laser

OCIS codes 140.3390; 140.5960; 160.3900

1 引言

在汽车制造领域,除了提高整车安全性、节能性及舒适性等,同时也需考虑车身的耐腐蚀性及延长车身的使用寿命。由于镀锌钢板具有良好的耐大气腐蚀性能,越来越多被用于汽车白车身制造,目前镀锌钢板在汽车白车身上的使用率已经高达70%^[1-2]。近年来,由于激光焊接技术的快速发展^[3],采用激光焊接技术拼焊等厚和不等厚汽车用镀锌钢板受到人们的重视,并得到了快速的应用^[4-6]。例如北京工业大学国家产学研激光中心崔怀洋等^[7],采用CO₂激光对汽车用等厚和不等厚镀锌钢板进行激光对接拼焊,结果表明镀锌层具

收稿日期: 2014-02-14; 收到修改稿日期: 2014-02-19; 网络出版日期: 2014-06-12

基金项目: 沈阳市科学技术计划项目(F13-319-6-03)

作者简介: 徐国建(1959—),男,博士,教授,主要从事激光加工工艺及成套加工设备等方面的研究。

E-mail: xuguojian1959@hotmail.com

* 通信联系人。E-mail: zhongliming1101@126.com

有牺牲保护作用使得激光焊缝不易腐蚀。哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室陈彦斌等^[8], 通过激光填丝钎焊镀锌板, 分析了镀锌板激光填丝钎焊的主要缺陷及其关键影响因素。但是仍然没有充分发挥激光高焊接速度的优势^[7-10]。

半导体激光具有光电转换率高(其光电转换效率高于40%), 金属对其吸收率高^[11-12](半导体激光波长范围为915~1030 nm, 金属对其吸收率高于CO₂、YAG及光纤激光)。但是关于光纤耦合半导体激光应用在镀锌薄钢板材料的焊接, 到目前为止还没有详细的报道。本研究采用光纤耦合半导体激光对汽车用不等厚($t=0.7/1.4$ mm)镀锌钢板进行了激光拼焊, 并与用相同输出功率条件下的快轴流TURBO CO₂激光器焊接方法比较其焊接性能和焊接效率, 为光纤耦合半导体激光在高速焊接条件下应用于汽车用不等厚镀锌钢板的焊接提供了有价值的理论依据。

2 试验过程

2.1 试验材料

本试验中, 两种不同厚度($t=0.7$ mm/1.4 mm)的汽车用镀锌钢板(GA)的化学成分组成如表1所示。其镀锌层的标准为45 g/m²。

表1 镀锌钢板化学成分

Table 1 Chemical compositions of galvanized sheet mass fraction

Substrates	Chemical composition /%				
	C	Mn	S	P	Fe
GA	≤0.15	≤0.6	≤0.05	≤0.05	Bal

2.2 试验条件

试验设备系统主要由光纤耦合半导体激光器、控制系统、机器人、激光焊接头等组成, 构成的焊接系统如图1所示。半导体激光器型号为LDF4000-40(由四个模块组成, 其波长选为915、940、980、1030 nm来增加半导体激光束的焦深), 其额定输出功率为4 kW, 传输光纤的直径为400 μm, 聚焦透镜焦长为100 mm, 准直透镜焦长为100 mm, 焊接保护气体为氩气(Ar), 机器人型号为KUKA KR30HA。

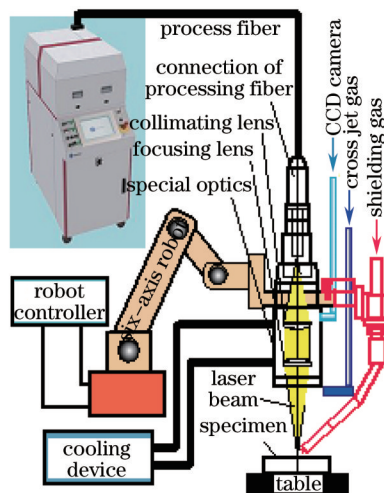


图1 光纤耦合半导体激光焊接系统

Fig.1 Welding system of fiber coupled diode laser

使用PRIMES Focus Monitor焦点监测仪, 测量了LDF4000-40半导体激光器的焦点直径和光束质量, 其焦点直径约为 $\Phi 0.40$ mm, 光束参数积(BPP)约为23 mm×mrad。

焊接过程中, 经试验确定的焊接工艺参数为: 激光输出功率3.0 kW、离焦量0 mm、保护气体(Ar)流量25 L/min、焊接速度范围4.0~7.0 m/min。金相试样采用体积分数为5%的硝酸乙醇溶液进行腐蚀, 并采用电子显微镜观察镀锌钢板焊接接头的组织特性, 用数显维氏硬度计对焊接接头硬度进行测试, 用万能力学试验机对焊接试件力学性能进行分析。

3 试验结果与讨论

3.1 焊接工艺

在上述的焊接工艺参数下,对汽车用不等厚($t=0.7/1.4$ mm)镀锌钢板进行对接拼焊。焊接速度在高达7.0 m/min时的焊缝宏观照片如图2所示,焊缝成型良好,正面和背面焊缝过渡圆滑。在同样的激光输出功率下,镀锌钢板光纤耦合半导体激光的焊接速度比CO₂激光提高1.2倍以上^[7]。通过对焊接过程的观察,发现其焊接稳定性有所改善、飞溅量减少。试验发现镀锌钢板试件的锌层的烧损宽度约为0.2 mm,焊缝附近的锌层的烧损宽度与焊接热影响区的宽度相差不大,这是由于锌的蒸发温度与钢的奥氏体-铁素体相变点基本相同^[6]。

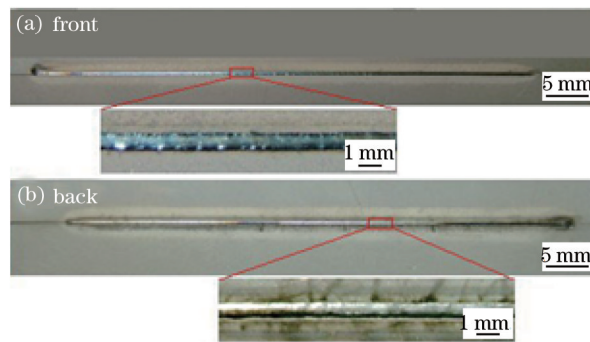


图2 焊接速度7.0 m/min时的焊缝外观形貌

Fig.2 Weld appearance of 7.0 m/min welding speed

镀锌钢板激光焊接的基本问题是解决锌蒸气对焊接过程的影响,本试验条件下,锌蒸气的产生包括上、下表层锌的气化。试验过程中通过侧吹保护气体Ar、夹具中设置排气通道工艺措施将焊接过程产生的锌蒸气进行排出。焊接速度在4.0~7.0 m/min范围时的焊接接头横断面照片如图3所示。由图可知,虽然图3(c)疑是焊缝表面咬边缺陷,但焊缝与母材之间过渡较圆滑;图3(d)疑是焊缝背面不饱满,但焊缝与母材(厚板侧)之间过渡圆滑。在本次试验的焊接速度范围内时,其焊缝成形良好,熔合线处结合良好,实现了冶金结合及单面焊双面成型的效果。焊缝及热影响区没有焊接缺陷存在,焊缝中气孔得到了有效控制,采用侧吹保护气体和排气通道的方法后,锌对激光焊接的影响可以忽略。

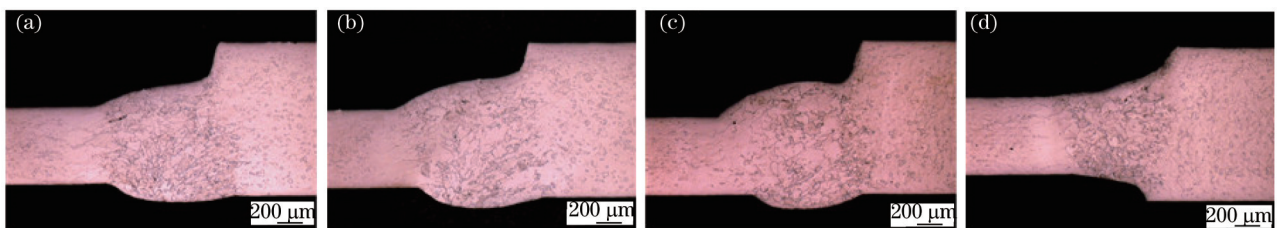


图3 不同焊接速度下的焊缝横断面。(a) 4.0 m/min;(b) 5.0 m/min;(c) 6.0 m/min;(d) 7.0 m/min

Fig.3 Weld cross-section at different welding speeds. (a) 4.0 m/min; (b) 5.0 m/min; (c) 6.0 m/min; (d) 7.0 m/min

3.2 焊接接头组织

焊接速度为7.0 m/min时的镀锌钢板焊接接头(左侧 $t=0.7$ mm,右侧 $t=1.4$ mm)显微组织如图4所示。由图可知,母材金属和热影响区金属主要由铁素体组织组成,并含有少量的珠光体组织;焊缝金属主要是由铁素体组织组成,并含有一定量的珠光体,其珠光体含量高于母材金属和热影响区金属,这归因于激光焊接的快速冷却作用。此外,观察显微组织,可进一步证实焊缝金属与母材金属之间形成良好的冶金结合,在焊接接头中不存在焊接缺陷。

3.3 焊接接头硬度

采用数显维氏硬度计,对焊接速度为7.0 m/min时的镀锌钢板的焊接接头(左侧 $t=0.7$ mm,右侧 $t=1.4$ mm)硬度进行了测试,其结果如图5所示。硬度测试条件为压头载荷为0.98 N,由焊缝中心向母材方向测试,测量间隔为0.2 mm。由于焊接金属中珠光体组织含量高于母材金属和热影响区金属,所以与母材金

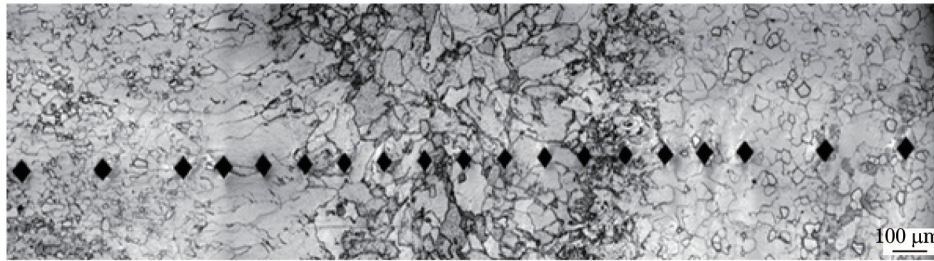


图4 焊接接头显微组织

Fig.4 Microstructure of the weld joints

属和热影响区金属相比,硬度值提高到约为 142 HV,母材金属的硬度值约为 97 HV,热影响区金属的硬度由焊缝金属硬度逐渐过渡到母材金属硬度,同时可看到本试验条件下镀锌钢板焊接接头热影响区非常窄小,组织强化使得该区域硬度高于母材,宽度约为 0.2 mm。

3.4 机械性能和杯突试验

采用电子万能力学试验机,对镀锌钢板(GA)在不同焊接速度下的焊接接头机械性能进行了测试,其拉伸试验结果的宏观外观照片如图 6 所示。不同焊接速度下的焊接接头拉伸试样的断裂位置均位于母材金属 ($t=0.7$ mm)上,拉伸试验结果表明,其抗拉强度为 284.3~306.7 MPa,伸长率为 18.9%~20.4%。

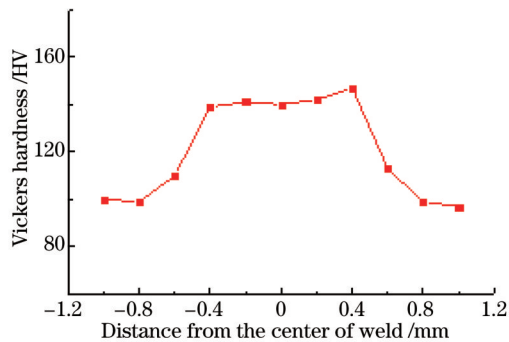


图5 焊接接头硬度分布

Fig.5 Hardness distribution of the weld joint

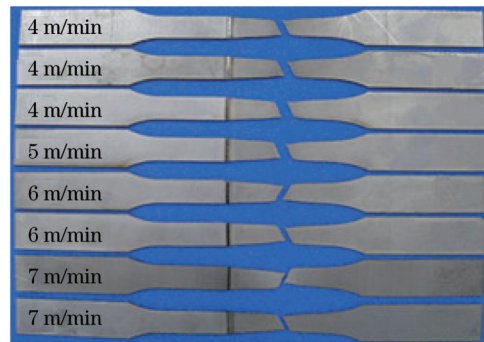


图6 拉伸试样的形貌

Fig.6 Morphology of tensile specimen

不同焊接速度下的焊接接头杯突试验结果如图 7 所示。由图可知杯突高度范围为 9.6~12.1 mm(母材金属的杯突高度范围为 9.8~12.5 mm),裂纹位置均发生于母材金属 ($t=0.7$ mm)上,与轴快流 CO_2 激光焊接接头的杯突性能(杯突高度范围内 9.5~11.8 mm)基本相当。由此可以说明半导体激光焊接接头的塑性基本满足要求。

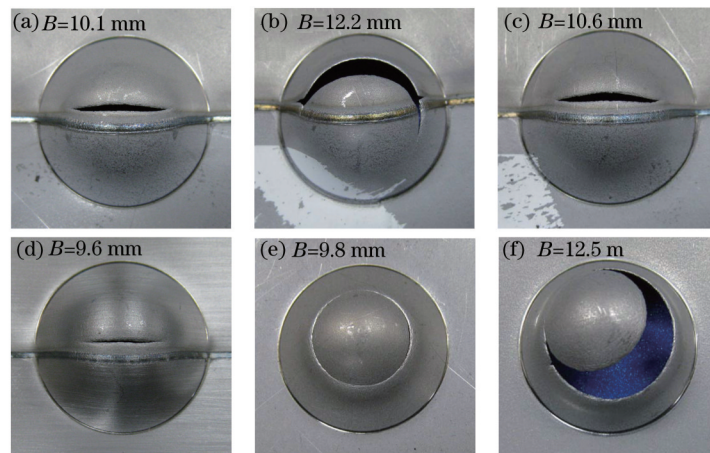


图7 不同焊接速度下的焊接接头及母材的杯突试验结果。(a) 4.0 m/min; (b) 5.0 m/min; (c) 6.0 m/min; (d) 7.0 m/min; (e) 6.0 m/min; (d) 7.0 m/min; (e) 母材 $t=0.7$ mm; (f) 母材 $t=1.4$ mm

Fig.7 Cupping test results of weld joints under different welding speeds and base metal. (a) 4.0 m/min; (b) 5.0 m/min; (c) 6.0 m/min; (d) 7.0 m/min; (e) substrate $t=0.7$ mm; (f) substrate $t=1.4$ mm

4 结 论

1) 本试验使用光纤耦合半导体激光器,对汽车用不等厚($t=0.7/1.4$ mm)镀锌钢板(GA)进行激光对接拼焊试验,在高达7.0 m/min的焊接速度下,焊缝成型良好。

2) 镀锌钢板焊缝金属由铁素体和部分珠光体组成,硬度值比母材提高50%;热影响区(HAZ)金属基本由粗大的铁素体组成,硬度值变化并不明显。

3) 拉伸和杯突试验结果证实,镀锌钢板焊接接头的强度和塑性与轴快流CO₂激光焊接结果相当。

4) 在同等焊接条件下,光纤耦合半导体激光器与快轴流CO₂激光器比较,其焊接速度提高1.2倍以上。

参 考 文 献

- 1 Colomban P, Cherifi S, Despert G. Raman identification of corrosion products on automotive galvanized steel sheets [J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2008, 39(7): 881-886.
- 2 Tan Juan, Wang Jun, Gao Haiyan, *et al.*. Recent advances in high strength galvanized sheet steels[J]. *Materials Review*, 2008, 22(2): 64-67.
谭 娟,王 俊,高海燕,等. 高强度合金化热镀锌研究进展[J]. *材料导报*, 2008, 22(2): 64-67.
- 3 Chen Yanbin. *Modern Laser Welding Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2005. 64-65.
陈彦宾. *现代激光焊接技术*[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 64-65.
- 4 Yih-fong T. Gap-free lap welding of zinc-coated steel using pulsed CO₂ laser[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 29(3-4): 287-295.
- 5 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.
- 6 Huang Zhijun, Hu Lunji, Liu Jianhua, *et al.*. Research on zinc distribution and corrosion resistance of laser welded joint of galvanized steel[J]. *Welding and Joining*, 2004, (5): 17-20.
黄治军,胡伦骥,刘建华,等. 镀锌板激光焊接接头锌的分布及耐蚀性实验[J]. *焊接*, 2004, (5): 17-20.
- 7 Cui Huaiyang, Chen Kai, Zuo Tiechuan. CO₂ laser weldability of galvanized steel sheets[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, 25(4): 115-118.
崔怀洋,陈 铠,左铁钊. 镀锌钢板的CO₂激光焊接性[J]. *焊接学报*, 2004, 25(4): 115-118.
- 8 Feng Xiaosong, Chen Yanbin, Li Liqun, *et al.*. Laser brazing with wire feed of galvanized thin sheets[J]. *Applied Laser*, 2004, 24(6): 357-360.
封小松,陈彦宾,李俐群,等. 镀锌板激光填丝钎焊[J]. *应用激光*, 2004, 24(6): 357-360.
- 9 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.
- 10 Li Xincheng, Gao Haorong, Zhu Weixing, *et al.*. Microstructural quantitative analysis and mechanical property forecasting of laser tailored welded blank [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(12): 3150-3154.
李新城,高豪荣,朱伟兴,等. 激光拼焊板组织定量分析及其力学性能预测[J]. *中国激光*, 2010, 37(12): 3150-3154.
- 11 Lin Xiuchuan, Shao Tianmin. Lumped method for the measurement of laser absorptance of materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(5): 856-859.
蔺秀川,邵天敏. 利用集总参数法测量材料对激光的吸收率[J]. *物理学报*, 2001, 50(5): 856-859.
- 12 Zou Dening, Lei Yongping, Liang Gongying, *et al.*. Determination of laser absorptivity of metal by numerical calculation technique and trial-and-error method[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(7): 737-740.
邹德宁,雷永平,梁工英,等. 用数值计算技术和试错法确定金属材料表面对激光的吸收率[J]. *金属学报*, 2001, 37(7): 737-740.