

文章编号: 0258-7025(2008)12-2047-05

# 高功率激光焊接汽车用高强钢 B450LAD 组织与性能

李亚玲 黄 坚 高志国 吴毅雄 阎 启

(上海交通大学材料与工程学院 上海市激光制造与材料改性重点实验室(筹), 上海 200240)

**摘要** 采用 15 kW CO<sub>2</sub> 激光器对 1.8 mm 厚的热镀锌薄板 B450LAD 进行了高功率激光焊接。对工艺优化后所得到的 4 组焊接工艺规范参数的焊接接头进行宏观与微观组织分析、显微硬度试验以及拉伸力学性能试验。结果表明,在激光功率 5.8~12.9 kW 以及焊接速度 3~7 m/min 参数下,1.8 mm 厚 B450LAD 镀锌钢板均可获得成形良好、无缺陷的焊缝;焊缝截面呈上宽下窄的倒梯形,热影响区(HAZ)相当窄;焊缝熔化区组织均为马氏体、细晶区组织为少量马氏体和铁素体;其焊缝中心显微硬度约为母材(BM)的 2 倍;焊接接头具有良好的拉伸力学性能,且 4 种拉伸试样均断于母材处。实验的 4 组工艺参数可作为此钢材不同应用场合下高功率激光焊接的工艺参考。

**关键词** 激光技术;高功率激光焊接;B450LAD 高强度镀锌钢板;焊缝组织;力学拉伸

**中图分类号** TG 456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.2047

## Structure and Properties of High Power Laser Welding of High Strength Steel B450LAD for Vehicles

Li Yaling Huang Jian Gao Zhiguo Wu Yixiong Yan Qi

(School of Material Science and Engineering, Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification (Prepared), Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** Experiments of high power laser welding of 1.8 mm thick galvanized steel B450LAD are performed by using a 15 kW CO<sub>2</sub> laser. Four sets of welding process parameters are acquired through process optimization. The macrostructure and microstructure analysis, microhardness measurements and tensile tests have been done on these four welded joints. It is shown that sound welds can be achieved on 1.8 mm thick B450LAD steel at a laser power of 5.8~12.9 kW and a welding speed of 3~7 m/min. The weld section looks like an inverted trapezia and the heat affect zone (HAZ) is very narrow. Martensite structure is found in weld center and little martensite with more ferrite structure is observed in fine grained region. The hardness in weld center is 2 times as high as the base material. The welded joints show good tensile properties, and all tensile specimens are broken in the base material (BM). So these four groups of welding parameters can be used for guiding the actual high power laser welding of B450LAD at different applications.

**Key words** laser technique; high power laser welding; B450LAD high strength galvanized steel; microstructure; tensile strength

### 1 引言

随着汽车的轻量化,高强钢材料由于强度高、塑性好、抗冲击性强、价格较低,在汽车上的用量有取代现有传统钢铁材料的趋势<sup>[1]</sup>。与此同时对耐蚀性能和抗冲撞性能的高要求迫使汽车用钢向经过涂

镀处理的高强化方向发展;而高强度镀锌钢板以其优良的耐蚀性能、涂装性能和焊接性能等优点已越来越多地应用于汽车上<sup>[2,3]</sup>。宝钢开发生产的牌号为 B450LAD,厚 1.8 mm 薄板是一种合金化热镀锌板,其屈服强度等级为 450 MPa,属于高强钢

收稿日期:2008-01-02;收到修改稿日期:2008-04-22

作者简介:李亚玲(1985—),女,江西人,硕士研究生,主要从事激光加工方面的研究。E-mail:liyaling2008@sjtu.edu.cn

导师简介:黄坚(1967—),男,上海人,副教授,主要从事焊接过程数值模拟和优化、激光加工技术、堆焊技术以及焊接过程控制的研究。E-mail:jhuang@sjtu.edu.cn

范围<sup>[1]</sup>。

在汽车行业的发展中,为提高生产自动化水平和产品质量,激光焊接被最为广泛地应用。在 20 世纪 90 年代初,汽车行业就已安装了整个工业用激光器装机量的 15%<sup>[4]</sup>。而高功率激光焊接不仅为生产提供了高的焊接速度,而且还为新的工艺设计提供了减轻部件重量、缩短制造时间、降低生产成本的条件<sup>[4]</sup>。本文探索热镀锌铁合金 B450LAD 薄板相关配套激光焊接的工艺参数,分析了 4 组工艺参数

表 1 B450LAD 化学成分(质量分数,%)

Table 1 Content of elements in B450LAD (mass fraction, %)

C	S	Si	Mn	Ti	Cr	Ni	Al	Cu	V
0.20	0.0047	0.1733	2.34	0.0023	0.0204	0.0115	0.0207	0.0147	0.0031

研究采用平板对接焊的形式,试验材料为 250 mm×130 mm。切割后试板待焊端面保持平整垂直,端口处用丙酮仔细去除油污以及锉刀除氧化物处理,并在如图 1 所示的工装台上用夹具装配好,然后利用型号为 TLF 15000 turbo (TRUMPF Lasertechnik GmbH) 最大输出功率为 15 kW 的 CO<sub>2</sub> 激光器进行焊接。焊接时,先改变离焦量参数,以达到最佳的焊接接头形状。采用氦气作为侧

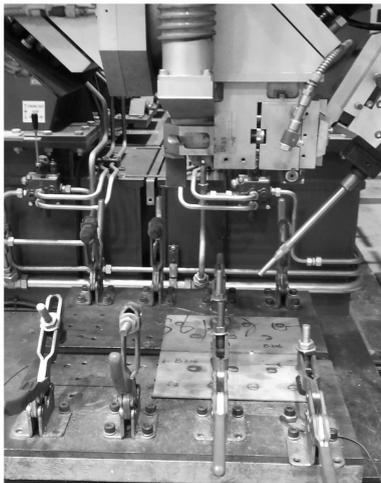


图 1 激光焊工作台装置

Fig. 1 Work bench for laser welding

表 2 B450LAD 激光焊接工艺参数

Table 2 Laser welding process parameters of B450LAD

No.	Laser power $P/\text{kW}$	Welding velocity $V/(\text{m}/\text{min})$	Defocusing amount $\Delta f/\text{mm}$	Linear energy $E/(\text{J}/\text{mm})$
1	5.8	3	-1	116
2	7.6	4	-1	114
3	9.35	5	-1	112
4	12.9	7	-4	111

下(即激光功率由小变大,相应焊接速度由慢到快)焊接接头的组织和性能,评价了高功率激光焊接对汽车板的实际适用性。

## 2 试验材料及方法

试验材料为宝钢生产的表面热镀锌铁合金的 B450LAD 薄板,厚 1.8 mm,母材化学成分如表 1 所示,其抗拉强度为 623 MPa,屈服强度为 435 MPa,延伸率为 27.84%。

吹保护气体<sup>[5]</sup>,气体流量为 28 L/min。然后通过工艺优化获得不同焊接速度下 4 组全熔透焊接的工艺参数,如表 2 所示。

按照国标截取焊接接头力学拉伸试样,采用 AG-100KNA 万能材料试验机进行力学拉伸试验,并对焊接接头取样进行金相组织分析以及维氏显微硬度分析,硬度测试仪为 HX-1000 显微硬度机,所施加载荷为 500 g。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 焊接接头的金相分析

#### 3.1.1 宏观金相图

图 2 为 B450LAD 激光焊接接头横截面宏观金相图照片。可以清晰地看出焊接接头的三个区域,从焊缝中心往外依次为焊缝区、热影响区(HAZ)和母材(BM)。焊缝截面整体结构呈倒梯形,即上宽下窄,体现了焊接热量首先在材料表面得到较多的吸收;在激光焊小孔效应下板材中下半部分形成了窄且熔宽较一致的熔化区。所得的焊缝深宽比约为 1.2:1,仍然体现了激光深熔焊的特点。焊缝区组织呈柱状晶结构,具有铸态结晶特征;热影响区可进一

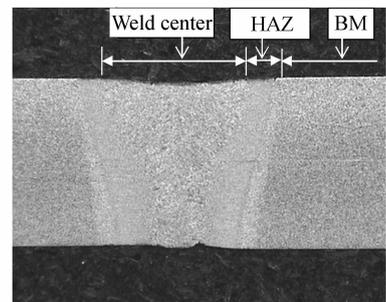


图 2 B450LAD 激光焊焊接接头横截面典型宏观金相图

Fig. 2 Macrostructure of laser welded joint of B450LAD

步分为近熔合线附近的过热粗晶区、完全重结晶区(细晶区)以及近母材的不完全重结晶区。粗晶区的特点是晶粒较粗大,常常是焊接接头的薄弱处,而细晶区则是组织性能最好的区域。总的来说,B450LAD 激光焊接接头热影响区比较窄,截面上表面处热影响区宽度约为0.4 mm,下表面处则约为0.6 mm,当中最宽处约0.68 mm。另外,激光焊接时,由于没有填充焊丝,焊缝上表面略有塌陷。

### 3.1.2 显微组织特征

图3为试样1焊缝上部的显微组织结构图,依

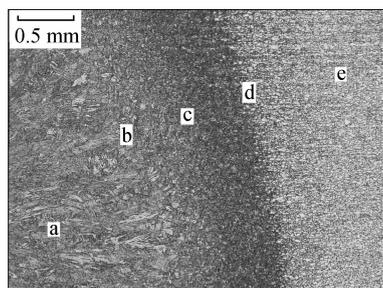


图3 试样1激光焊接接头显微组织

Fig. 3 Microstructure of laser welded joint of specimen 1

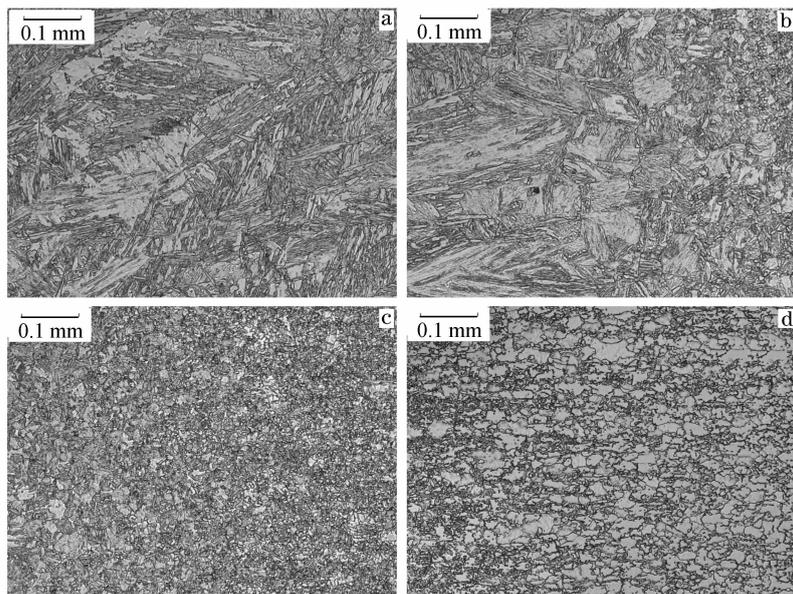


图4 放大的试样1激光焊接接头不同区域的显微组织

Fig. 4 Enlarged microstructure of different regions in laser welded joint

4组工艺参数规范下,试样所得的焊接接头显微组织类似。但由于4组工艺参数的线能量存在差异,故所得的焊接接头各个区域的宽窄有所区别,选取焊缝横截面中心线处进行接头各个区域宽度的测量,如图5所示。可以发现,随着线能量的减少,从3~7 m/min其热影响区宽度越来越窄,从0.68 mm减少到0.4 mm。7 m/min工艺下得到的热影响区最

次为焊缝组织 a—近熔合线 b—细晶区近焊缝内侧 c—近母材外侧 d—母材 e。可以看出,激光焊接接头热影响区很窄,主要是细晶区和窄小的粗晶区,以及不完全重结晶区。

图4为图3试样1放大的激光焊接接头不同区域显微组织图。a为焊缝区显微组织图,b为熔合区显微组织图,左侧为焊缝边缘区,右侧为热影响区的粗晶区,可以清楚地看到,焊缝区和熔合区左侧组织均为粗大板条状的低碳马氏体,熔合区右侧的过热粗晶区组织也为低碳马氏体,但相对尺寸要小。由于激光焊热输入大,冷却速度快,故在焊缝和熔合线处附近容易形成淬冷后的马氏体组织,靠近熔合线处热影响区的组织较为粗大,但比常规焊接接头的仍然小,另外还可以看见极少量的铁素体和残余奥氏体。c为细晶区附近显微组织图,左下角为近熔合区的少量马氏体,右侧为细晶区发生完全重结晶,形成了细小的铁素体和马氏体组织。d为热影响区近母材外侧,组织是由粗细不匀的铁素体以及微量马氏体逐渐到母材组织,即铁素体和少量碳化物。

窄,这是由于其线能量输入相对最小,冷却速度最大,从而焊件定点处峰值温度  $T_m$  相对较低,故得到的热影响区较窄。

### 3.2 焊缝接头的显微硬度

显微硬度曲线表示沿着焊缝横截面中位线母材、热影响区和焊缝区硬度分布。4组工艺参数下所得焊接接头HV硬度曲线如图6所示。4组工艺

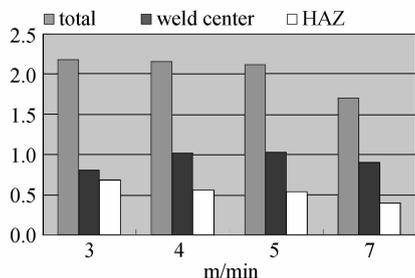


图 5 4 组工艺参数下焊接接头各区域宽度的变化

Fig. 5 Width of different regions in laser welded joint of four sets of welding process parameters

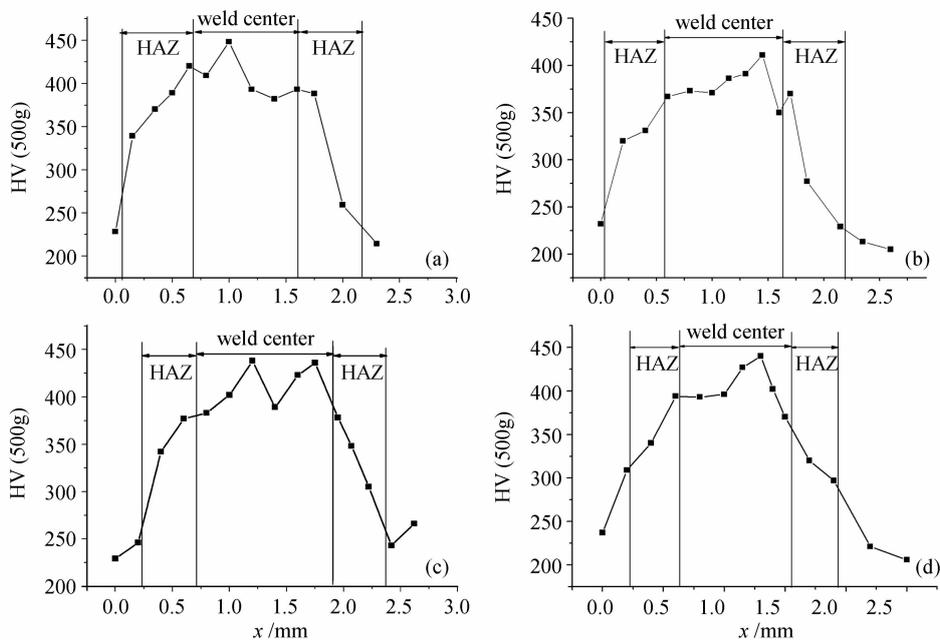


图 6 4 组工艺参数下焊接接头的 HV 显微硬度结果

Fig. 6 HV hardness results of four sets of laser welded joint

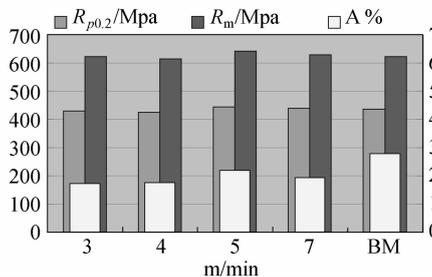


图 7 B450LAD 激光焊接接头力学拉伸结果

Fig. 7 Tensile strengths of laser welded joint of B450LAD

可见接头强度高于母材强度。图 7 的拉伸试验结果显示, 4 组焊接接头试样的屈服强度 ( $R_{p0.2}$ ) 在 420 MPa 以上, 与母材相当。抗拉强度 ( $R_m$ ) 则均在 600 MPa 以上, 激光焊接接头未出现软化。焊接接头的延伸率 (A) 均在 17% 以上, 在焊速为 5 m/min

参数下显微硬度曲线趋势大致相同, 焊缝中心处由于为马氏体组织, 硬度值最高, 约在 370~440HV 之间, 为母材硬度值的 2 倍左右。中心处硬度呈现折线式变化是由于焊缝元素和组织的不均匀性, 但硬度曲线的趋势基本符合马氏体量从焊缝中心到母材递减的规律。

### 3.3 焊接接头力学拉伸结果

对母材以及 4 种焊接试样进行拉伸, 结果如图 7 所示。

4 种工艺参数下焊接试样的焊接接头拉伸试验结果均为断于母材处, 而非焊缝和热影响区处, 由此

时延伸率达到了最大, 约 21%, 均小于母材 28% 的延伸率, 这是由于延伸受到了焊接接头存在的影响。无论从强度还是从延伸率看, 焊速为 5 m/min 的焊接规范下接头拉伸性能最佳。

## 4 结 论

1) 厚 1.8 mm B450LAD 热镀锌薄板可在激光功率 5.8~12.9 kW 范围内实现焊接速度为 3~7 m/min 的快速激光焊接。焊接接头成形良好, 无焊接缺陷。

2) B450LAD 热镀锌薄板激光焊接得到上宽下窄的倒梯形焊缝截面。热影响区相当窄, 在所采取的工艺规范下只有 0.4~0.68 mm 的宽度。4 组工艺参数下, 得到的焊缝熔化区组织均为马氏体, 细晶区组织则为马氏体和铁素体, 母材的组织为铁素体

和少量碳化物,从焊缝中心往外,马氏体量越来越少。

3) B450LAD 热镀锌薄板激光焊接得到的焊接接头中心处显微硬度约为母材的 2 倍,热影响区介于两者之间;硬度值表明焊缝强度高于母材。激光焊接接头具有良好的拉伸力学性能。所采用的 4 组工艺规范均可应用于实际焊接。

### 参 考 文 献

- 1 Shen Xiaolong. The research on laser welding quality of high strength steel [D]. Changsha: Hunan University, 2006. 5~7  
申晓龙. 高强度镀锌钢激光焊接质量的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006. 5~7
- 2 Wu Qiang, Chen Genyu, Wang Gui *et al.*. CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 激光焊接[J]. 中国激光, 2006, **33**(8):1133~1138

- 3 Qiang Wu, Jinke Gong, Genyu Chen. Research on laser welding of vehicle body [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, **40**(2):420~426

4 Zhang Jingbin, Ma Zhongwei, Xun Changtao *et al.*. Application & development of high-power laser welding [J]. *Hot Working Technology*, 2005, (3):64~67

张镜斌,马中伟,孙长涛等. 高功率激光焊接的应用及发展[J]. 热加工工艺, 2005, (3):64~67

- 5 Liu Kun, Liu Jinhe, Zhou Chang. Control of laser induced plasma during laser penetration welding [J]. *Hot Working Technology*, 2007, **36**(23):86~88

刘 锟,刘金合,周 畅. 激光深熔焊接光致等离子体的控制[J]. 热加工工艺, 2007, **36**(23):86~88

\*\*\*\*\*

## “光学制造”栏目征稿启事

《激光与光电子学进展》是中国科学院上海光学精密机械研究所主办的激光、光电子领域行业性期刊,中国科技核心期刊。该刊 1964 年创刊,至今已出刊 500 余期,旨在促进国内外学术交流,沟通科研单位、生产部门与用户的联系,促进中国光学事业的发展。

中国是世界最大的光学制造产业基地,全世界 70% 的光器件在中国加工制造。光学制造是光学产业的重要组成部分,也是光学技术不断发展的重要驱动力。为了深入研讨光学制造技术,探索光学制造的最新理念、成功案例、市场热点,《激光与光电子学进展》将从 2008 年 12 月起推出“光学制造”栏目,现特向国内外广大专家学者征集“光学制造”方面的研究成果、市场分析等方面的论文。

• 征稿内容:光学元件、光学元器件加工、光学仪器、光学薄膜、光学设计、光学材料、光学检测等光学制造领域;

• 征稿要求:涉及上述领域的最新研究成果、技术发展动态、热点问题讨论;产品、技术的开发设计成果和具体应用;介绍杰出的先进技术或性能/价格比优越的新产品;

• 投稿方式以及格式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgig.htm>)直接上传稿件(主题标明“光学制造”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:lop@siom.ac.cn(主题标明“光学制造”投稿),详情请参见中国光学期刊网:[www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)。本栏目投稿电子版请使用 MS-word 格式,如有问题欢迎垂询 021-69918198 与栏目编辑丁洁联系。

• 说明:此专栏稿件不收审稿费、版面费,论文一经录用,稿酬从优。