

# 基于 4 kW YAG 激光器的激光拼焊焊接工艺

房灵申 赵明扬

(中国科学院沈阳自动化所, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要** 分析了激光拼焊工艺特征,重点研究了在大功率固体激光器条件下,激光拼焊焊接工艺中激光功率、焊接速度和离焦量等因素变化对焊接质量的影响,得出了变化规律曲线。并系统全面地研究了目前汽车常用板材全厚度系列激光拼焊工艺,采用叠代寻优的方法获得了适用于全自动激光拼焊生产线的优化工艺规范。

**关键词** 激光技术; 激光拼焊; 激光焊接工艺; 焊接质量

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s1.0172

## Laser Tailor Welding with 4 kW YAG Laser

Fang Lingshen Zhao Mingyan

(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China)

**Abstract** The laser tailor welding craftwork was analyzed. The effects of laser power, welding speed and defocus on welding quality for high-power solid-state laser were studied, and the variation laws was plotted. The laser welding craftwork for common blanks of full thickness series in automotive industry was studied, and the optimal welding craftwork for full automatic laser tailor welding line was obtained with the method of interative optimization.

**Key words** laser technique; laser tailor welded; laser welding craftworks; welding quality

## 1 引言

经过近几十年来的研究和发展的,随着气体激光器、固体激光器、激光二极管抽运激光器、半导体激光二极管等技术的成熟和商品化,激光焊接作为一种高速度、非接触、变形小的生产加工方式在大量而连续的生产过程中得到应用<sup>[1,2]</sup>。激光拼焊由于具有能量密度高,焊缝深宽比大,变形和热影响区小,焊接速度快,满足工件不同部位对材料性能的不同需求,焊接质量好,容易实现自动化等众多优点,使其广泛应用于工业中各个领域。其中 YAG 激光器不仅具有体积小、储能高、方案简单和可靠性高的优点;而且还具有波长短、吸收率高和易于通过光纤传输等优点。但由于其设备价格较高,一次性投资费用比较大,维护及使用成本较高以及国内研究和测试方法和设备的滞后,我国对 YAG 激光焊接方面的研究开展较少,尤其是针对基于小孔效应的大功率深熔焊方面的研究较少。因此对 YAG 激光深熔焊工艺方面的研究,有利于加速激光焊接技术在国

内的应用和产业化进程<sup>[3,4]</sup>。

由于基于大功率 YAG 激光器的激光拼焊影响因素很多,如激光的照射条件,光束焦点的相对位置,保护气体的种类及参量,材料的热物理性等。特别是在全自动激光拼焊生产线上高生产效率、高合格率、高质量、宽包容性的要求下,焊接工艺研究尤为重要。为了获得稳定的激光拼焊过程、保证焊缝的成型质量,就必须深入研究这些因素对焊接的影响,以便认识激光深熔焊的规律和正确选择工艺参量。

## 2 试验设计与分析

对于主要应用于汽车行业的激光拼焊成套装备来说,产量都在几十万片到上百万片。然而国产汽车钢材,不同批次、不同厂家相同牌号的钢材内部化学成分均匀性也不一致,又由于激光焊接对材料的敏感性,这就要求激光焊接过程中焊接工艺规范必须加以微调,来保证焊接质量的一致性。激光拼焊

工艺参量对焊接质量影响规律研究的目的是为激光焊接工艺规范微调提供调整方向和参考依据,同时也为激光拼焊工艺库的建立提供推理规则。

评价焊接质量的指标主要有焊缝的深度、宽度、热影响区大小以及焊缝显微组织和焊接接头性能等。而影响焊接质量的工艺参量主要包括激光模式、功率、焊接速度、焦点位置等,合适的工艺参量是取得良好焊接效果的关键。针对激光焊接在汽车工业中的应用越来越广泛,我们运用自行设计的焊接设备对汽车钢板进行焊接实验,研究激光功率、焊接速度、焦点位置等工艺参量变化对焊接熔深、焊缝宽度的影响。

### 2.1 试验设备

全自动激光拼焊零号生产线,如图 1 所示,激光器为德国通快公司 Nd:YAG 固体激光器(型号 HL4006D)。

主要参量:激光器额定输出功率为 4000 W;激光波长为 1.06 μm;光斑尺寸为 φ0.6 mm;焦距为 223 mm;光束质量为 25 mm·mrad;工作台面尺寸为 1650 mm×1500 mm;工作台 X 方向行程为 1500 mm,Y 方向行程 1650 mm,Z 方向行程 800 mm。

年产量为 120 万件,生产节拍为 15 秒/件,最大焊接速度为 15 m/min。

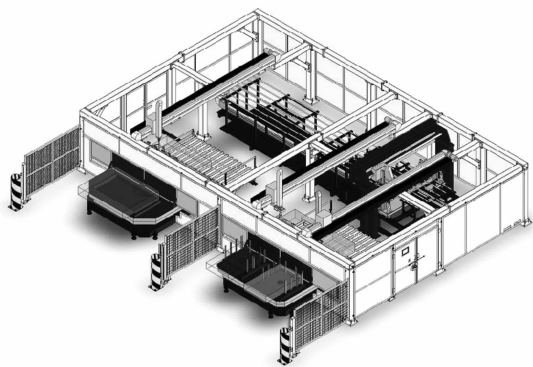


图 1 全自动激光生产线

Fig. 1 Tailor blank laser welding line

### 2.2 试验材料与规格

试验材料:200×100 汽车钢板,材料牌号 DC06 和 DC04Z;材料化学成分(质量分数),如表 1 所示。

表 1 材料化学成分

Table 1 Chemical components of blank sheet

Steel trademark	C	Si	Mn	P	S
DC06	0.008	0.03	0.03	0.02	0.015
DC04Z	0.08	—	0.04	0.02	0.003

## 3 试验结果与分析

采用侧吹氩气进行保护,对碳钢板进行激光拼焊实验,并对焊接试样进行测试和分析。

### 3.1 激光功率对焊接质量影响

激光功率通常指激光器的输出功率,功率密度是激光焊接中最关键的参量之一。采用较高的功率密度(即工件上功率密度大于 10<sup>6</sup> W/cm<sup>2</sup>),在微秒时间范围内,表层即可加热至沸点,大量汽化。图 2 为焊缝深度和宽度随激光功率变化的测量结果。其中焊接速度为 3.5 m/min,离焦量为 0。

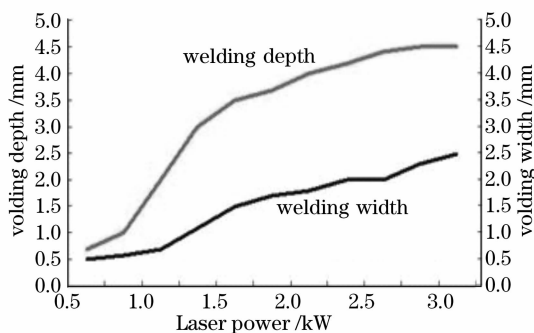


图 2 焊接熔深和熔宽与激光功率的关系

Fig. 2 Influence of laser power on depth and width of welding

由图 2 可见,当激光功率比较小时,焊接熔深很浅,不到 1 mm,随着激光功率增加,熔深增加也比较缓慢,此时激光能量只被材料表面吸收,当功率大于 0.7 kW 后,随着激光功率的增加,熔深急剧增加,两者几乎成线性关系,而且焊缝宽度也在增加,说明在这个过程中,高的激光功率密度使得熔融金属内形成了小孔效应,实现了深熔焊接。但当功率超过 3.0 kW 后,随着功率的增加,此时熔深基本上不增加,而焊缝宽度却还是继续增大,分析其原因,可能是随着功率密度的增大,小孔内产生的等离子体增多,对入射激光束进行屏蔽,使得激光能量难于到达孔底继续熔化金属,从而使熔深不再增加。

高功率密度对于材料的深熔焊接可以说是很有利的。对于较低功率密度(即工件上功率密度大于 10<sup>5</sup> W/cm<sup>2</sup>),表层温度达到沸点需经历数毫秒。激光焊熔深与激光输出功率密度直接有关,并且是入射光束功率和光斑直径的函数。在其他条件相同时,高功率激光焊接获得的熔深大,但当激光功率过大时容易飞溅而使焊接工件的表面形貌和焊接的质量均较差<sup>[5]</sup>。不同材料在相同的激光功率下焊接的熔深也有一定的差异,这与材料对激光的吸收有关,不同材料对激光的吸收系数不同,作用在工件上的

有效激光功率就有差异,从而就会产生不同的熔深。

### 3.2 焊接速度对焊接质量的影响

激光焊接时,可以用线能量来描述焊件接受激光辐射能量的情况。线能量定义为:单位长度焊缝接受的激光能量。焊接速度大时,焊缝的线能量小,熔深下降,反之,可以获得较大的熔深。图3是焊接熔深和焊缝宽度与焊接速度的关系,此时激光焦点位置在工件表面,焊接功率为2.5 kW。

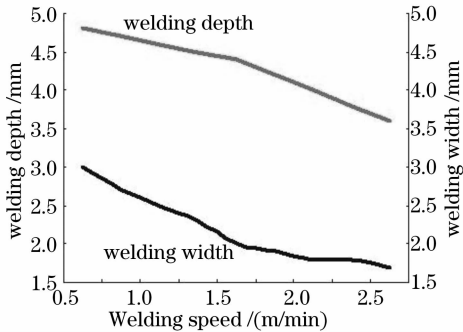


图3 焊接熔深、焊缝宽度与焊接速度的关系  
Fig. 3 Influence of welding speed on depth and width of welding line

从图3中可看出,随着焊接速度的增加,熔深和焊缝宽度逐渐减小,而深宽比有一定程度的增大。试验表明,熔深随焊接速度的增加几乎是呈线性下降。焊接速度在不同功率下与熔深的关系很大。在较低的焊接速度下,随着焊接速度的提高,熔深明显减小。而在焊接速度超过一定值后,再提高焊接速度对熔深的影响逐渐减弱,这就是说,激光焊接可以在较高的焊接速度下实现深熔焊。在功率一定时,焊接速度越大,熔深越小<sup>[6,7]</sup>。

但是如果焊接速度过快或过慢,都会影响焊缝成型,图4分别是焊接速度为3.0 m/min, 4.0 m/min和5.0 m/min时的焊缝外形。

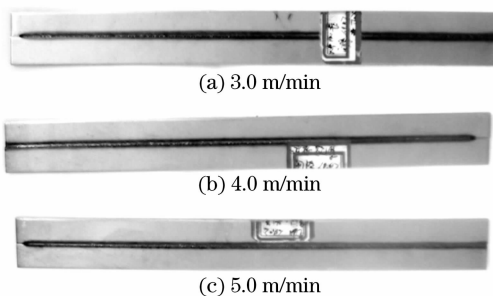


图4 不同焊接速度下的焊缝外形

Fig. 4 Shape of welding line of different welding speed

缝凸凹不平,这是由于焊接速度过快,金属未熔透和自淬速度过快以致不能流动和融合,而且焊缝中的有害气体如 $N_2$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ 及CO来不及逸出,使焊缝气孔增多,从而会影响焊缝的抗弯强度和外观。而当焊接速度过慢时,可以观察到由于过量的热传导引起的焊道向侧向扩展,热影响区过热、扩大<sup>[8]</sup>。所以适中的焊接速度对焊接也非常重要。

### 3.3 离焦量对焊接的影响

作用于工件表面的激光功率密度除了与激光束的焦斑功率密度有关外,还取决于工件表面与焦斑的相对位置(离焦量)。离焦量是指工件表面离激光焦点的距离,焦点在工件表面内时为负离焦,反之为正离焦。激光焊接通常需要一定的离焦量,因为激光焦点处光斑中心的功率密度过高,容易蒸发成孔。离开激光焦点的各平面上,功率密度分布相对均匀<sup>[9]</sup>。离焦量不仅影响焊件表面激光光斑的大小,而且影响光束的入射方向。

图5为激光功率 $P=3.5$  kW焊接速度 $v=5.5$  m/min时不同的离焦量对熔深和焊缝宽度的影响,可见激光束的离焦量对熔深有很大的影响,激光束腰处的功率密度最大,束腰位于工件上时(正离焦)工件获得的功率密度相应降低,会形成“钉头”状焊缝,熔深减小;当束腰处于工件内时(负离焦),可增加熔深,形成V形焊缝<sup>[10]</sup>。从试验可以看出,焦点位置在钢板表面下0.5~1.0 mm左右最佳,而且离焦量不能太大,否则会导致熔深损失太大,深宽比下降,甚至因功率密度不足而导致焊接失败。

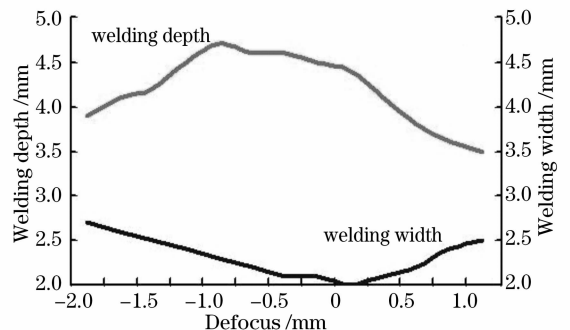


图5 熔深、焊缝宽度与离焦量的关系  
Fig. 5 Influence of defocusing on depth and width of welding line

## 4 汽车常用板材全厚度系列实验

通过以上试验,采用叠代寻优的方法获得到了适用于全自动激光拼焊生产线的最优化工艺规范,工艺规范如表2所示。

由图4可见,当焊接速度过快时,在被焊工件焊

表 2 最优化工艺规范参量  
Table 2 Parameters of tailor blank welding line

Blank thickness /mm	Optimal parameter			
	Power /kW	Welding speed /(m/min)	Defocus /mm	Displacement quantity /mm
0.7+1.4	3.5	9.3	0.3	0
0.8+1.6	3.8	8.8	0.2	0.1
1.0+1.6	4	10	0.2	0.06
1.0+2.0	4	10	0.2	0.08
1.0+2.5	4	6.4	0.6	0.05
1.5+2.0	4	8.5	-0.3	0.06
1.5+2.5	4	6.4	-0.1	0
2.0+2.5	4	6	0	0
0.8+0.8	2.8	13	0.2	0
1.0+1.0	3.0	12.3	0	0
1.5+1.5	3.5	9	0.2	0
2.0+2.0	4	7.2	0.1	0

## 5 结 论

1) 实验表明采用高性能固体激光器能够满足全自动化激光拼焊生产线的需要。

2) 采用大功率高性能激光器激光拼焊效率高,焊缝深宽比更大,而且激光拼焊由于加热和冷却速度都更高更快,使得焊缝热影响区更小,焊缝正面和背面的焊缝宽度都较小。

3) 激光拼焊工艺参量:激光功率、焊接速度和离焦量等对焊接质量都产生较大影响,并得到了变化规律曲线。

4) 通过逐步叠代的方法最终获得了适用于全自动激光拼焊生产线的最优工艺规范,基本满足生产线的需要。

## 参 考 文 献

1 Wu Qiang, Chen Genyu, Wang Gui *et al.*. CO<sub>2</sub> laser welding of zinc coated high strength steel [J]. *Chin. 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

2 Wu Jun, Li Liang. Laser welding and its application to the automobile manufacturing overseas [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

3 Tong Xin. The quality and useness of laser welding[J]. *Welding Technology*, 2000, (3): 11~12

佟 欣. 激光焊接的特性及应用领域[J]. 焊接技术, 2000, (3): 11~12

4 Wang Hailin, Huang Welling, Zhou Zhuoyou *et al.*. Laser welding of 8 mm thick stainless steel plates[J]. *Chin. 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

5 Zheng Qiguang, Qin Yingxiong, Zhu Wence *et al.*. Experimental study of high-speed bult welding of automobile tailored steel sheet with high power CO<sub>2</sub> laser[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(5): 422~426  
郑启光,秦应雄,朱蕴策等. 汽车剪裁板的激光高速拼焊试验研究[J]. 光学技术, 2002, **28**(5): 422~425

6 Liu Jianhua, Hu Lunji, Xiong Jiangang *et al.*. Laser bult welding of steel used in automobile[J]. *China Mechanical Engineering*, 1996, **7**(4): 96~98  
刘建华,胡伦骥,熊建刚等. 汽车用薄钢板的激光拼焊[J]. 中国机械工程, 1996, **7**(4): 96~98

7 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

8 E. Dunmore, J. M. Jocular, D. Gravely. Modeling of high power CW Nd:YAG laser welding [C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2889**: 26~33

9 Cui Huaiyang, Chen Kai, Zuo Tiechuan. CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 激光焊焊接性[J]. 焊接学报, 2004, **25**(4): 115~119

10 C. Tix, G. Simon. Model of a laser heated plasma interaction with walls arising in laser keyhole welding [J]. *Phys. Rev.*, 1994, **50**: 453~462