

# 不等厚激光拼焊板咬边缺陷研究

陈东<sup>1</sup> 景宽<sup>2</sup> 宋华<sup>1</sup> 王宇<sup>1</sup>

(1.辽宁科技大学 机械工程与自动化学院 辽宁 鞍山 114051 2.中国科学院 沈阳自动化研究所 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:**不等厚激光拼焊板广泛应用于汽车车身制造,实现了按照强度需求合理分配钢板厚度,在不降低强度和安全性前提下实现了汽车的轻量化和节能减排。咬边缺陷是不等厚激光拼焊板的常见缺陷之一,严重影响其冲压时的抗拉强度。基于激光拼焊的工艺特点,对咬边缺陷的成因和解决办法进行了研究,确定了偏移量、线能量、错配及精剪误差与咬边的关系,并对薄板发生咬边的最小熔宽进行了实验研究。该研究结果可为优化激光拼焊工艺参数提供理论支持。

**关键词:**激光拼焊;咬边;偏移量;线能量

中图分类号:TH16;TH132 文献标识码:A 文章编号:1001-3997(2015)05-0236-03

## Research on the Undercut Problem of Unequal-Thickness Tailor Welded Blanks

CHEN Dong<sup>1</sup>, JING Kuan<sup>2</sup>, SONG Hua<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>

(1.School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning Anshan 114051, China; 2.Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Liaoning Shenyang 110016, China)

**Abstract:** Unequal-thickness tailor welded blanks (TWB) are widely used in automotive body manufacturing, equal strength design is realized by using this method. TWB ensured the body's strength and safety, and achieved a lightweight and energy saving cars. Undercut is one of the common defects of unequal-thickness tailor welded blanks which affecting its tensile strength seriously. Based on technological features of tailored laser welding, the causes and solutions of undercut are studied, the relationships between line energy, mismatch, fine cut error and undercut are made, and the minimum melting width of the thinner blanks is obtained. The research results can provide theoretical support for optimizing tailored laser welding process parameters.

**Key Words:** Tailored Laser Welding; Undercut; Offset; Line Energy

## 1 引言

激光拼焊是指将几块不同材质、不同厚度、不同涂层的钢板在冲压成型前用激光焊接在一起,然后进行成型的技术<sup>[1]</sup>。不等厚激光拼焊板在汽车车身制造上得到了广泛应用,对于减轻汽车重量、减少材料消耗、减少加工工序、降低生产成本、实现等强度设计等都有十分重要的作用<sup>[2-4]</sup>。

咬边是指沿焊趾(或焊根)处出现的低于母材表面的凹陷或沟槽的一种缺陷。咬边是激光拼焊中的一种常见缺陷,它破坏了焊接的连续性,使焊缝有效截面减小,并引发应力集中,严重降低激光拼焊板冲压时的抗拉强度。咬边示意图如图1所示。激光拼焊中对咬边深度有严格限制,规定咬边深度不能大于薄板厚度的0.1倍( $h < 0.1T_2$ )<sup>[5]</sup>。

目前国内外关于电弧焊、TIG焊、激光-电弧复合焊等的咬边问题已经进行了较多的研究工作,对于焊接速度、焊接角度、焊接电流等与咬边的关系进行了较为深入的研究<sup>[6-8]</sup>,但关于激光拼焊

板咬边问题的研究较少,拟对激光拼焊咬边缺陷的成因及解决办法展开研究,从而提高激光拼焊的焊接质量。

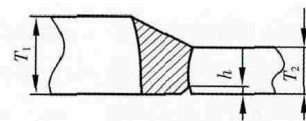


图1 咬边示意图

Fig.1 Schematic Diagram of Undercut

## 2 实验设备、材料与材料

### 2.1 实验设备与材料

实验设备是沈阳自动化研究所研制的全自动激光拼焊生产线,如图2所示。设备采用Nd:YAG固体激光器,激光器功率4kW,波长1.06 $\mu$ m,光斑直径0.6mm,焦距223mm。辅助设备有焊缝跟踪系统、Servo-robot焊缝质量检测系统、多目倒置金相显微镜(5XB-PC)等。实验材料是车用冷轧板(DC06),钢板厚度范围

来稿日期 2014-10-22

基金项目:中国科学院知识创新工程方向项目“全自动激光拼焊成套装备关键技术研究及示范应用”资助(07F7060701)

作者简介:陈东(1972-)男,辽宁鞍山人,博士,副教授,主要研究方向:激光拼焊技术

为(0.9~3.0)mm 材料的化学成分 如表 1 所示。材料的机械性能, 如表 2 所示。

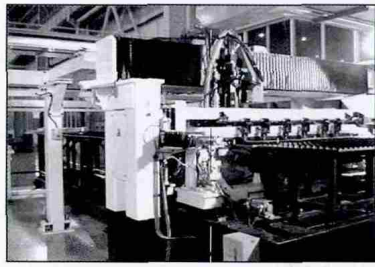


图 2 激光拼焊生产线  
Fig.2 Tailored Laser Welding Production Line

表 1 材料的化学成分

Tab.1 Chemical Composition of Material

元素	C	Si	Mn	P	S
质量分数(%)	0.008	0.03	0.03	0.02	0.015

表 2 材料的机械性能

Tab.2 Mechanical Properties of Materials

抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)	屈服强度 $\sigma_s$ (MPa)	延伸率 $\delta$ (%)
250	90-100	47-50

### 2.2 实验方法

为减小定位误差、夹紧误差和钢板接边下料误差对实验的影响, 焊接前采用数控铣床对钢板接边进行精加工, 采用手动方式定位, 夹紧后用塞尺测定间隙大小, 并根据要求进行调整。

## 3 实验过程与结果分析

### 3.1 偏移量与咬边

偏移量(offset)是激光拼焊的一个重要工艺参数, 焊接中采用合理的正偏移量(激光中心偏向厚板)可以提高对间隙的适应能力, 改善焊缝形貌<sup>[9]</sup>。但采用正偏移量时, 将导致薄板熔化宽度减小, 如图 3 所示, 薄板熔化宽度过小会导致薄板熔合缺陷, 在薄板与母材的接触部位形成咬边, 因此需要对偏移量进行限制, 既需要确定焊接中薄板发生咬边的最小熔化宽度。

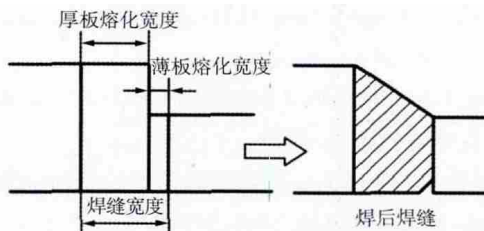


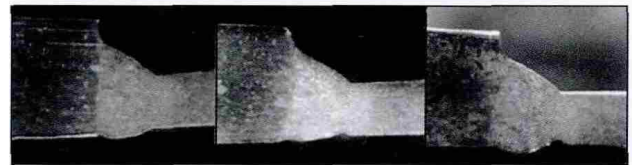
图 3 薄板熔宽与咬边  
Fig.3 Thin Steel Melting Width and Undercut

为研究薄板最小熔宽, 对长度为 500mm、厚度为 1mm 与 2mm 的 DC06 钢板进行了焊接试验, 焊接偏移量, 如表 3 所示。焊接激光功率为 3.5kW, 焊接速度为 5m/min, 离焦量为 -0.5mm, 焊缝间隙为 0.06mm。

表 3 偏移量数据  
Tab.3 Offset Datas

序号	1	2	3	4	5	6	7
偏移量(mm)	0.27	0.3	0.33	0.36	0.40	0.43	0.47

采用不同偏移量时的焊接结果, 如图 4 所示。可以看出偏移量为 0.43mm 时, 薄板侧开始出现轻微的咬边, 如图 4(b)所示。偏移量为 0.47mm 时, 薄板侧发生了严重咬边, 如图 4(c)所示。通过对焊缝宽度的测量, 结合采用的偏移量数值进行计算, 得到 DC06 钢板的最小允许熔宽为 0.1mm。同时对 DC04 和 Q235 钢板进行了相同的焊接实验, 结果表明材料是影响薄板最小熔宽的主要因素, 而厚度对薄板最小熔宽无显著影响。



(a)offset=0.27 (b)offset=0.43 (c)offset=0.47

图 4 不同偏移量下的焊缝截面

Fig.4 The Weld Cross-Section of Different Offsets

### 3.2 焊接线能量与咬边

#### 3.2.1 线能量与焊缝宽度

激光拼焊线能量是指激光功率与焊接速度的比值, 它反映了激光在单位时间单位长度上的能量输入量, 直接影响焊接时激光的熔化范围(焊缝宽度)。

Swifthook<sup>[10]</sup>对激光深熔焊的穿透能力进行了研究, 并建立了体现激光熔化范围、激光功率、焊接速度、板厚以及材料关系的数学模型:

$$483P_L(1-r_f)=v \frac{W}{1000} \frac{T_1+T_2}{2000} \rho C_p T_{melt} \quad (1)$$

借鉴该模型, 并考虑不等厚板激光拼焊的特殊性, 建立了式(2), 该式体现激光线能量与焊缝宽度关系, 可以用于计算指定焊接条件下的平均焊缝宽度:

$$W=9.66 \times 10^8 \frac{P_L}{v} \frac{1}{T_1+T_2} \frac{(1-r_f)}{\rho C_p T_{melt}} \quad (2)$$

式中  $P_L$ —激光功率(kW);

$r_f$ —材料的反射率;

$v$ —焊接速度(m/s);

$W$ —平均焊缝宽度(mm);

$T_1、T_2$ —厚板厚度、薄板厚度(mm);

$\rho$ —材料的密度(kg/m<sup>3</sup>);

$C_p$ —材料的比热容(J/kg·°C);

$T_{melt}$ —材料的熔化温度(K)。

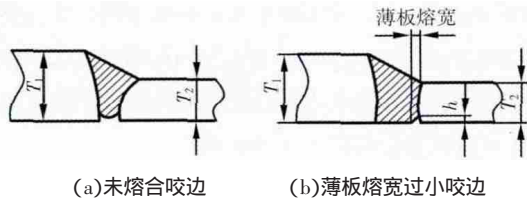
#### 3.2.2 线能量与咬边

从式(2)中可以看出, 焊缝宽度与线能量、钢板厚度、钢板材料等因素有关, 在其它条件不变的前提下, 线能量是影响焊缝宽度的主要因素。在不等厚板激光拼焊中, 在正常情况下, 焊缝金属应能够随着熔池边缘适时凝固、稳定熔化, 以获得正确的熔池侧缘形状。

而当线能量不足时, 将会导致下面两种情况:

(1)当线能量不足时, 会导致焊缝底部未熔合, 引起咬边, 如图 5(a)所示。

(2)激光熔化宽度减小,引起薄板侧熔化宽度减小,薄板熔宽不足导致在薄板侧形成咬边,如图5(b)所示。第二种情况在激光拼焊中更为常见。



(a)未熔合咬边 (b)薄板熔宽过小咬边

图5 线能量与咬边

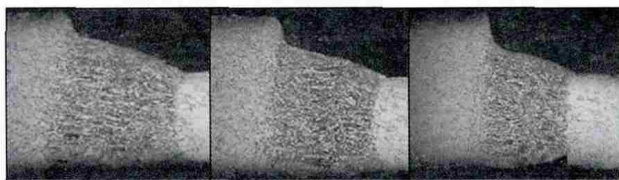
Fig.5 Line Energy and Undercut

为验证上述分析结果,在保持其它参数不变的前提下,通过调整激光功率或焊接速度的方式得到了不同的线能量,如表4所示。在不同线能量下对厚度为0.9mm与1.5mm的DC06钢板进行焊接试验,焊接中采用0.3mm的偏移量,离焦量为-0.5mm,焊缝间隙为0.06mm。

表4 线能量参数表  
Tab.4 Line Energy Datas

序号	1	2	3	P	S
激光线能量(kW/m/s)	1	0.8	0.6	0.45	0.3

线能量分别为1、0.6和0.3时的焊接结果,如图6所示。从图6中可以看出,随着激光线能量的减小,焊缝宽度逐渐减小,当线能量为0.3时,由于薄板的熔化宽度过小,出现了咬边缺陷。



(a)line energy=1 (b)line energy=0.6 (c)line energy=0.3

图6 线能量与咬边

Fig.6 Line Energy and Undercut

可以看出将激光线能量控制在合理的范围内,是保证焊缝不发生咬边的必要条件。

### 3.3 错配与咬边

不等厚激光拼焊板焊接后形成一侧表面平齐的状态,错配是指在应平齐的一侧沿厚度方向产生了位错,错配量大,易造成错配处未熔合或形成内咬边缺陷。激光拼焊中要求错配量小于0.1倍的薄板厚度。

### 3.4 坡口、毛刺与咬边

精密剪切是激光拼焊中最常用的钢板接边处理工艺,精剪后钢板边缘会形成一定的倾角和毛刺,对接后会形成小的V形坡口,并且在坡口下端存在尖锐边,在焊接时该尖锐边会很快熔化,而激光熔化的金属不会很快填满母材空缺处,因此会产生咬边。可见,控制和减小精剪的加工误差是减少咬边的必要措施。

## 4 结论

不等厚激光拼焊板咬边缺陷的成因有别于其它焊接工艺,它与激光偏移量、线能量、定位误差及加工误差等因素有关。

(1)在不等厚板激光拼焊中,薄板熔化宽度过小,将导致未

熔合性咬边,薄板最小熔宽主要与材料有关,车用冷轧钢板DC06的最小熔宽为0.1mm。

(2)采用正偏移量导致薄板熔化宽度减小,薄板熔化宽度过小将引发咬边,因此确定偏移量数值时应考虑薄板最小熔宽要求。

(3)线能量直接影响焊缝宽度,焊缝宽度间接影响薄板熔化宽度,当线能量不足时,会导致薄板熔宽过小,引发咬边缺陷。

(4)错配和剪切误差都是咬边缺陷的诱发因素,焊接前应采取相应的控制措施。

## 参考文献

- [1] Zhao Ming-yang, Zou Yuan-yuan, Chen Dong. Research on correlation between weld concavity and weld process parameters in tailored blank laser welding [C]. Advanced Materials Research, Shenzhen, China, 2011 (154): 553-557.
- [2] 陈伟, 吴毅明, 吕盾. 差厚激光拼焊车门内板的成形性能研究[J]. 中国机械工程, 2006(11): 1188-1190.  
(Chen Wei, Wu Yi-ming, Lv Dun. Research on formability of tailor welded blanks with different thickness in door inner stamping [J]. China Mechanical Engineering, 2006(11): 1188-1190.)
- [3] Natsumi F. Laser welding technology for joining different sheet metals in a one-piece stamping process [J]. International Journal of Materials and Product Technology, 1992, 7(2): 219-233.
- [4] 张萌, 徐敏. 长焊缝激光拼焊焊缝碾压预成型技术研究[J]. 机械设计与制造, 2011(5): 149-151.  
(Zhang Meng, Xu Min. Study on rolling and preprocessing of long weld with laser welding [J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(5): 149-151.)
- [5] ISO13919-1-1996(E) Welding electron and laser-beam welded joints guidance on quality levels [S]. German version, 1996.
- [6] 高明, 曾晓雁. 激光-电弧复合焊接咬边缺陷分析及抑制方法[J]. 焊接学报, 2008, 29(6): 149-151.  
(Gao Ming, Zeng Xiao-yan. Mechanism and remedy of undercut formation during laser arc hybrid welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 149-151.)
- [7] 吉玲, 卢振洋. TIG焊产生咬边影响机理的仿真计算[J]. 电焊机, 2006, 36(6): 17-20.  
(Ge Ling, Lu Zhen-yang. Principle of undercut simulation in TIG welding [J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(6): 17-20.)
- [8] 陈东, 赵明扬, 朱天旭. 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): 1489-1493.  
(Chen Dong, Zhao Ming-yang, Zhu Tian-xu. Research on effect of gap on weld quality of tailored laser welding and compensation method [J]. China Mechanical Engineering, 2011(22): 1489-1493.)
- [9] Chen Dong, Zhao Ming-yang, Zhu Tian-xu. Experimental research on sunken weld of tailor welded blanks [C]. CMCE2010, Changchun, China, 2010 (6): 37-40.
- [10] S William M. Laser Material Processing [M]. London: Springer, 2003: 177-178.