

# 光束摆动对窄间隙激光横焊焊缝成形及气孔的影响

武震东, 黄瑞生, 曹浩, 韩鹏薄, 李林, 魏鹏宇  
(中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司, 哈尔滨 150028)

**摘要:** 【目的】为满足船舶设计特殊结构位置的需求,研究了摆动参数(摆动频率和摆动幅度)对单道焊道成形及气孔的影响规律。【方法】以 20 mm 厚的 10Ni5CrMoV 高强钢板为试验材料,采用窄间隙摆动激光填丝焊方法进行横焊,测试了焊缝成形及气孔率,检测了激光能量分布及激光在坡口内的空间分布状态。【结果】结果表明,相较于常规激光焊,摆动激光焊可改善 10Ni5CrMoV 钢的单层焊道成形并有效抑制横焊过程中气孔的产生;摆动幅度是影响表面形成的主要因素,其影响激光能量在坡口内的分布状态从而影响单层焊道的表面成形,该次试验中摆动幅度为 2.2 mm 时的成形最优;摆动频率是影响气孔产生的主要因素,该次试验中摆动频率大于 150 Hz 即可避免气孔的产生。【结论】摆动激光抑制窄间隙激光横焊过程中气孔缺陷主要原因是频率增加导致能量分布峰值降低,熔宽增加使气泡逃逸路径增加,熔深降低使得逃逸路程降低,因此,深宽比小的焊道可以有效避免气孔产生。最后采用合理的摆动幅度和摆动频率实现了 20 mm 高强钢窄间隙激光横焊。

**关键词:** 窄间隙激光填丝焊; 横焊; 摆动激光; 焊道成形; 气孔

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20240308001

## Effect of beam oscillating on formation and porosity of weld by narrow gap laser horizontal welding

WU Zhendong, HUANG Ruisheng, CAO Hao, HAN Pengbo, LI Lin, WEI Pengyu  
(Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China)

**Abstract:** [Objective] In order to meet requirements of special structural position of ship design, influence of oscillating parameters (oscillating frequency and oscillating amplitude) on formation and porosity of single pass was studied. [Methods] 20 mm thick 10Ni5CrMoV high strength steel plate was used as test material, narrow gap oscillating laser welding with filler wire was used for horizontal welding. Formation and porosity of weld were measured, and laser energy distribution and spatial distribution state of laser in groove were measured. [Results] The results showed that, compared with conventional laser welding, oscillating laser welding could improve single pass formation of 10Ni5CrMoV steel and effectively inhibit formation of porosity during horizontal welding process. Oscillating amplitude was the main factor affecting surface formation, which affected distribution state of laser energy in groove and thus affected surface formation of single pass. In this test, when oscillating amplitude was 2.2 mm, the formation was the best. Oscillating frequency was the main factor affecting formation of porosity, and oscillating frequency greater than 150 Hz could avoid formation of porosity in this test. [Conclusion] The main reason for oscillating laser to suppress porosity defects in the process of narrow gap laser horizontal welding was that peak energy distribution decreased due to the increase of frequency, bubble escape path increased due to the increase of weld width, and decrease of penetration made escape distance decrease. Therefore, pass with a small penetration-width ratio could effectively avoid formation of porosity. Finally, reasonable oscillating amplitude and oscillating frequency were used to realize narrow gap laser welding of 20 mm thick high strength steel.

**Key words:** narrow gap laser welding with filler wire, horizontal welding, oscillating laser, pass formation, porosity

收稿日期: 2024-03-08

基金项目: “国防科技基础加强计划”资助项目

## 0 前言

高强度钢具有强度高、塑性好的特点,因此被广泛应用于船舶、建筑、核电、机械制造等领域<sup>[1]</sup>。目前在船舶制造中,中厚板及大厚板的特殊结构位置(立焊、横焊)仍采用传统弧焊技术进行焊接,存在焊接效率低下、焊接变形大的问题。针对船舶制造中特殊结构位置焊接的必要性,开发船舶制造中的特殊结构位置的高效、优质焊接工艺迫在眉睫<sup>[2-3]</sup>。

窄间隙激光填丝焊具有可焊厚度大、焊后变形小、焊接效率高等焊接优势,得到国内外诸多学者的青睐<sup>[4-6]</sup>。国内外针对窄间隙激光填丝焊的研究主要在平焊位置,特殊结构位置研究较少<sup>[7]</sup>。曹浩等学者<sup>[8]</sup>开发了高强度窄间隙摆动激光填丝立焊工艺;LI等学者<sup>[9]</sup>研究了窄间隙激光填丝立焊的工艺稳定性,使用立向上焊的方式及热丝的手段成功焊接了20 mm厚奥氏体不锈钢,但针对横焊位置的研究未见报道。针对不同焊接位置激光焊而言,CHANG等学者<sup>[10]</sup>和SHEN等学者<sup>[11]</sup>研究发现,横焊相对于平焊,由于熔池的受力情况不同,更难形成致密均匀的焊缝成形,并且横焊有着更大的气孔形成倾向。因此,稳定的焊缝成形和气孔缺陷的抑制应是窄间隙激光填丝横焊中的研究重点。

近年来,针对窄间隙激光填丝焊中出现的问题和不足,出现许多新兴的调控手段。例如,通过光束调制来改变激光在坡口内的能量分布和作用方式<sup>[12-15]</sup>;通过外加物理场,例如电磁场<sup>[16-17]</sup>、超声场<sup>[18]</sup>等来改变焊接过程的熔池行为;还有学者将热丝焊<sup>[19]</sup>引入

窄间隙填丝焊中来提高效率、抑制缺陷。但针对成形和气孔问题,主要是通过摆动激光的方式来控制成形、抑制气孔。夏佩云等学者<sup>[20]</sup>研究摆动参数对不锈钢焊缝成形和气孔的影响,使用圆形摆动激光频率在100~300 Hz可以兼顾较低气孔率和较好的焊缝成形。曹浩等学者<sup>[21]</sup>研究了摆动激光对高强度焊缝成形和气孔的影响,使用垂直摆动抑制了气孔的产生。徐楷昕等学者<sup>[22]</sup>研究了摆动参数对钛合金的影响规律,研究表明:圆形摆动和垂直摆动皆可有效抑制气孔产生。邹吉鹏等学者<sup>[23]</sup>研究了摆动参数对铝合金的焊缝成形和气孔的影响,并通过优化的工艺参数实现130 mm厚铝合金的焊接,目前为窄间隙激光焊在国内的最大实际厚度。并且上述研究皆为平焊位置,横焊位置的研究未见报道。

针对船舶制造中特殊结构位置高效优质焊接的需求,结合窄间隙激光填丝焊中横焊位置及其气孔缺陷研究空白,该文使用20 mm厚10Ni5CrMoV船用高强度钢作为焊接材料,基于窄间隙摆动激光填丝焊方法,研究了摆动频率和摆动幅度对横焊单层焊道成形及缺陷的影响,在优化工艺后实现了20 mm厚10Ni5CrMoV船用高强度窄间隙激光填丝横焊,为大厚度窄间隙激光横向多层焊工艺规范的开发提供理论支撑。

## 1 试验方法

选用20 mm厚的调质态10Ni5CrMoV高强度钢作为试验材料,选用直径1.2 mm的JS-80焊丝作为填充焊丝。母材及焊丝的化学成分见表1。

表1 母材及焊丝化学成分(质量分数,%)

Tab. 1 Chemical composition of base metal and welding wire (wt.%)

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Fe
10NiCrMoV	0.089	0.24	0.49	0.004 6	0.001 1	4.65	0.55	0.48	0.062	余量
JS-80 焊丝	0.063	0.41	1.70	0.006 2	0.002 9	2.60	0.62	0.61	0.001	余量

试验采用了光纤激光焊接系统,其中主要包括武汉锐科激光有限公司生产的RFL-6000型激光器,激光波长为1 080 nm±5 nm,额定最大输出功率为6 kW;激光枪枪头为IPG公司生产的IPG D50 Wobble激光枪,最大承受激光功率为12 kW,最大摆动幅度为5 mm,最大频率为600 Hz;KUKA机器人;EWM公司Tetrix 200 Hotwire热丝电源及送丝装置,另有基于

窄间隙激光填丝焊接技术开发的自制的送丝导管及保护气装置、工装夹具及试验平台。为兼顾送丝机构稳定及减少填充量,选择坡口底部宽度为3 mm。

由于焊接过程中试板受到焊接应力作用产生横向收缩变形,坡口两侧须预留一定量的坡口角度,因此,将坡口角度设置单边角度为1°,坡口尺寸如图1所示。

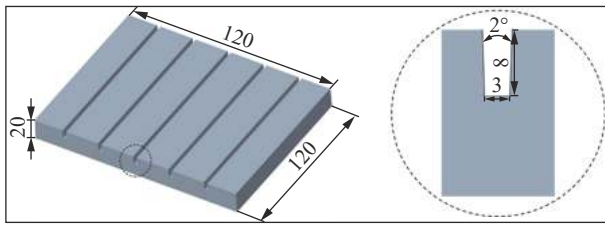


图1 窄间隙焊接坡口尺寸

Fig. 1 Size of narrow gap welding groove

焊接前使用 240 CW 砂纸对坡口两侧进行打磨, 后使用无水乙醇对坡口进行清理, 保护气体选择工业氩气, 保护气流量选择 15 L/min。图 2 为焊接过程及摆动激光轨迹示意图。

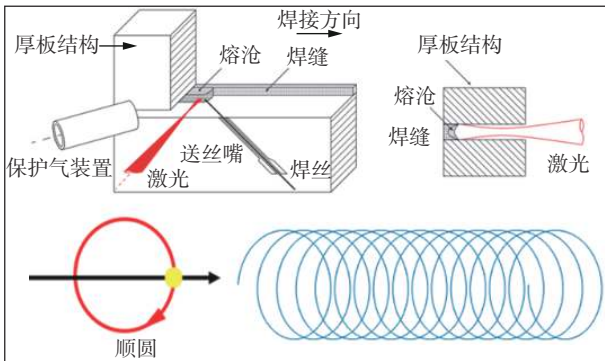


图2 窄间隙激光横焊及摆动激光示意图

Fig. 2 Schematic diagram of narrow gap laser horizontal welding and oscillating laser

试验过程中不改变常规激光焊接参数和摆动模式, 重点分析摆动幅度和摆动频率对单层焊道成形及气孔缺陷的影响规律, 摆动频率选择范围 0 ~ 300 Hz, 摆动幅度选择范围为 2.0 ~ 2.6 mm。

在窄间隙坡口内进行单道焊接后, 使用 X 射线对单层焊道进行探伤并计算气孔率, 气孔率  $\eta$  计算公式如式(1)所示

$$\eta = \frac{\sum A_p}{\sum A_b} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $A_p$  为气孔面积;  $A_b$  为焊道面积。随后从试板上取相片试样, 选用不同粗糙度的砂纸进行研磨, 用饱和  $\text{FeCl}_3$  溶液腐蚀 15 s; 随后在显微镜下观察单层焊道横截面成形, 并测量熔深及熔宽, 如图 3 所示, 将坡口内熔化深度定义为熔深  $H$ , 单层焊道横截面最宽的部分定义为熔宽  $B$ , 单层焊道深宽比  $\varphi = H/B$ , 熔合比为母材熔化的面积与熔化区面积相比。

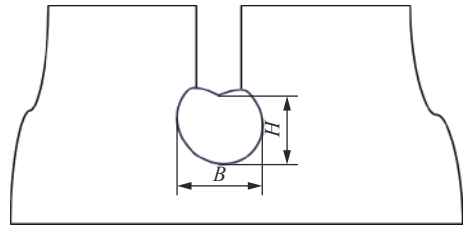


图3 熔宽、熔深测量示意图

Fig. 3 Measurement schematic diagram of weld width and penetration

## 2 结果与分析

### 2.1 常规激光与摆动激光焊道成形及气孔对比

由于窄间隙激光焊是一种单道多层焊接工艺, 因此, 焊缝表面平整度要求严格, 否则无法进行下一道的焊接, 形成优质窄间隙焊缝的前提就是优质成形工艺。

图 4 为常规激光与摆动激光的单层焊道表面成形与横截面成形。对比常规激光焊与摆动激光焊(参数见表 2)在窄间隙坡口内的单层焊道表面成形及横截面成形, 可以看出: 当常规激光焊参数相同时, 焊道成形差, 无法进行下一道的焊接。而引入摆动激光后, 单层焊道表面十分平整, 成形更加均匀。并且根据横截面来看, 常规激光形成的单层焊道熔深极大, 横焊时, 由于重力作用的下塌明显, 并且焊缝中心和焊道与坡口上侧壁交汇处皆存在气孔。而引入摆动激光后, 单层焊道熔深大幅度降低, 熔宽增加, 并且没有观察到气孔的产生。

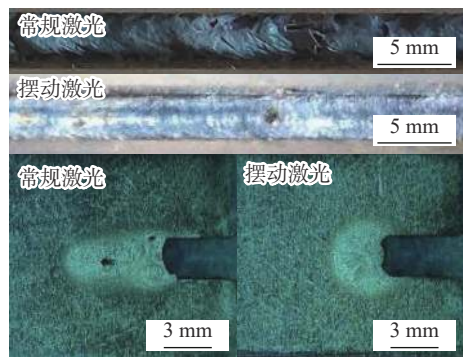


图4 常规激光与摆动激光单道表面成形与横截面成形

Fig. 4 Single pass surface formation and cross section formation by conventional laser and oscillating laser

图 5 为常规激光与摆动激光的单层焊道 X 射线探伤底片。根据图 5 可知: 常规激光形成的单层焊道

表2 常规激光与摆动激光焊接工艺参数

Tab. 2 Conventional laser and oscillating laser welding parameters

焊接模式	激光功率 $P$ /kW	焊接速度 $v_w$ /(m·min <sup>-1</sup> )	送丝速度 $v_f$ /(m·min <sup>-1</sup> )	摆动频率 $f$ /Hz	摆动幅度 $A$ /mm	保护气流量 $Q$ /(L·min <sup>-1</sup> )
常规激光	4	0.4	3	—	—	15
摆动激光	4	0.4	3	250	2	15

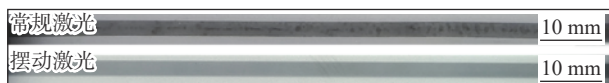


图5 常规激光与摆动激光单层焊道 X 射线探伤底片

Fig. 5 X ray inspection negative of single pass by conventional laser and oscillating laser

不仅存在大量气孔,并且气孔出现位置几乎都在单层焊道中心线以上,而引入摆动激光后可以很好地避免气孔及裂纹的产生。

## 2.2 摆动参数对单层焊道成形的影响

### 2.2.1 摆动频率对单层焊道成形的影响

图6为不同摆动频率下单层焊道的表面成形,其它参数见表2。在不同摆动频率下,单层焊道表面均获得良好的焊缝成形,说明摆动频率对焊缝表面成形影响较小。图7为不同摆动频率下单层焊道的横截面成形,图8为摆动频率对单层焊道熔深、熔宽、深宽比、熔合比的影响。根据图7和图8可知:熔深随摆动频率的增加不断下降,而熔宽随摆动频率增加不断增加,并在摆动频率大于200 Hz后,不发生显

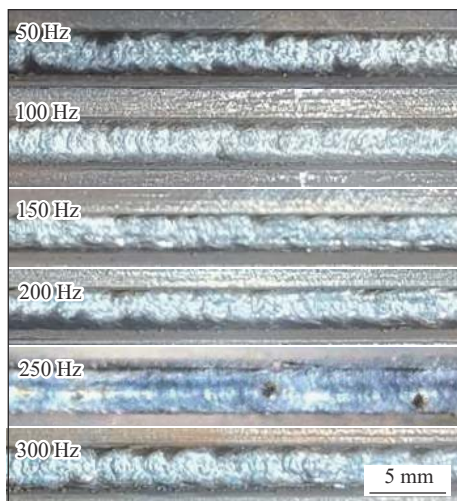


图6 不同摆动频率下单层焊道表面成形

Fig. 6 Surface forming of single pass under different oscillating frequency

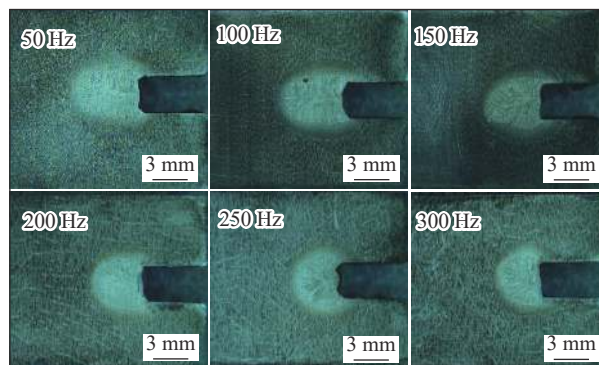


图7 不同摆动频率下单层焊道横截面成形

Fig. 7 Cross section formation of single pass under different oscillating frequency

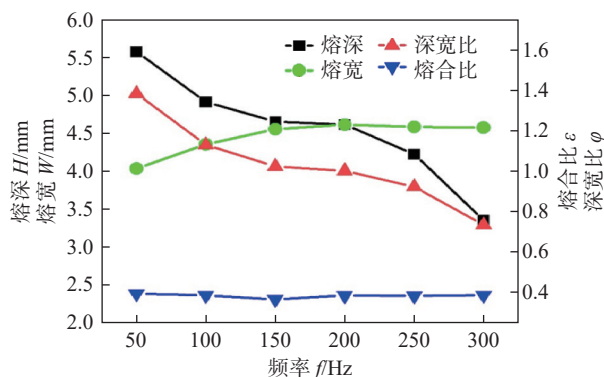


图8 摆动频率对熔深、熔宽、深宽比及熔合比影响

Fig. 8 Influence of oscillating frequency on penetration, weld width, penetration-width ratio and fusion ratio

著变化。焊道深宽比随着摆动频率的增加而不断降低,并且在200 Hz后,熔宽大于熔深,深宽比小于1。熔深、熔宽及深宽比的变化主要是由于摆动激光的加入改变了激光能量的分布规律。而熔合比都在0.4左右,主要是由于激光能量分布规律虽然发生了改变,但激光的总能量并没有发生改变。

### 2.2.2 摆动幅度对单层焊道成形的影响

图9为不同摆动幅度下的单层焊道表面成形,其它参数见表2。当摆动幅度为2.0 mm时,焊道成形差,填充金属在窄间隙坡口内不能很好铺展;当摆动

幅度为 2.2 mm 时, 填充金属在窄间隙坡口内可以很好地铺展; 继续增加摆动幅度, 当摆动幅度大于 2.4 mm 时, 出现烧边现象; 继续增加摆动幅度, 当摆动幅度为 2.6 mm 时, 烧边现象剧烈。

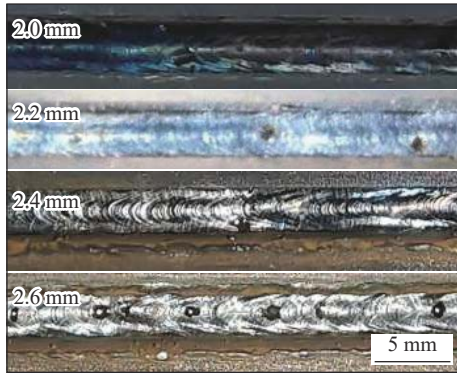


图 9 不同摆动幅度下单层焊道表面成形

Fig. 9 Surface formation of single pass under different oscillating amplitude

图 10 为不同摆动幅度下的单层焊道横截面成形。图 11 为摆动幅度对单层焊道熔深、熔宽、深宽比的影响。由图 10 和图 11 可知: 随着摆动幅度增加, 焊道熔深小幅度降低, 熔宽增加; 这是由于随着摆动幅度的增加, 激光能量分布规律发生改变, 更多的能量作用到窄间隙坡口两侧使得熔深小幅度降低、熔宽增加; 当摆动幅度达到 2.6 mm 后, 焊接时发生严重烧边, 导致激光能量严重损失, 熔深、熔宽大幅度降低, 熔化区面积大幅度降低, 导致焊道熔合比降低。

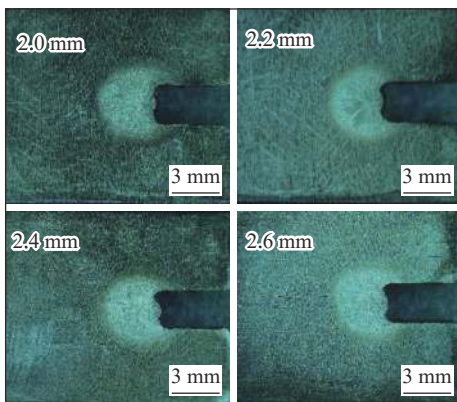


图 10 不同摆动幅度下单层焊道横截面成形

Fig. 10 Cross section formation of single pass under different oscillating amplitude

### 2.2.3 激光能量分布状态与焊道成形的关系

采用数学软件对不同摆动频率、摆动幅度下激光能量密度分布进行计算。对于常规激光而言, 激

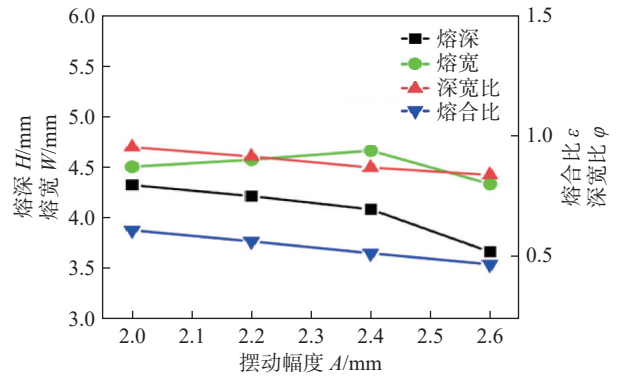


图 11 摆动幅度对熔深、熔宽、深宽比及熔合比的影响

Fig. 11 Influence of oscillating amplitude on penetration, weld width, penetration-width ratio and fusion ratio

光分布状态通常被认为呈高斯分布, 其具有作用面积小, 能量密度集中, 空间不均匀的特点, 引入摆动激光后, 光束的运动轨迹如式 (2) 所示, 即

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_0 t + A \cos(2\pi f t) \\ y(t) = y_0 + A \sin(2\pi f t) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $x$  为焊接方向;  $y$  为垂直于焊接方向;  $(x_0, y_0)$  为焊接起始点;  $v_0$  为焊接速度;  $A$  为摆动幅度;  $f$  为摆动频率。

常规焊接与不同摆动频率下的激光能量分布分别如图 12 和图 13 所示。可以看出: 常规焊接的能量峰值极高, 并且大部分能量集中于中心, 这就是常规焊接中单层焊道表面成形差并且熔深大的主要原因。对比图 12 和图 13 可知: 当引入摆动激光后, 激光能量分布的峰值降低, 并且峰值随摆动频率的增加而降低。由图 13 可知: 当频率大于 50 Hz 后, 能量分布状态几乎趋于一致, 结合不同频率下的单层焊道表面成

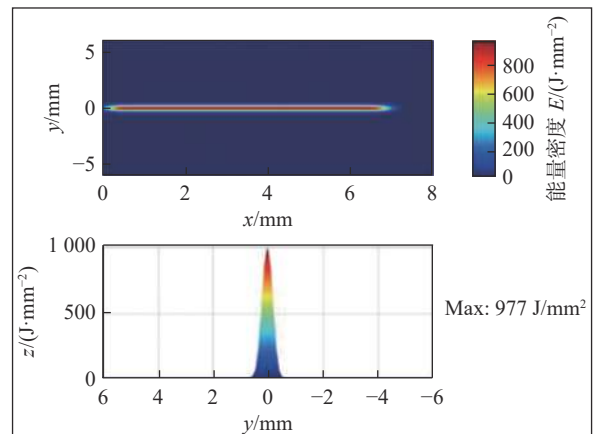


图 12 常规激光能量分布

Fig. 12 Conventional laser energy distribution

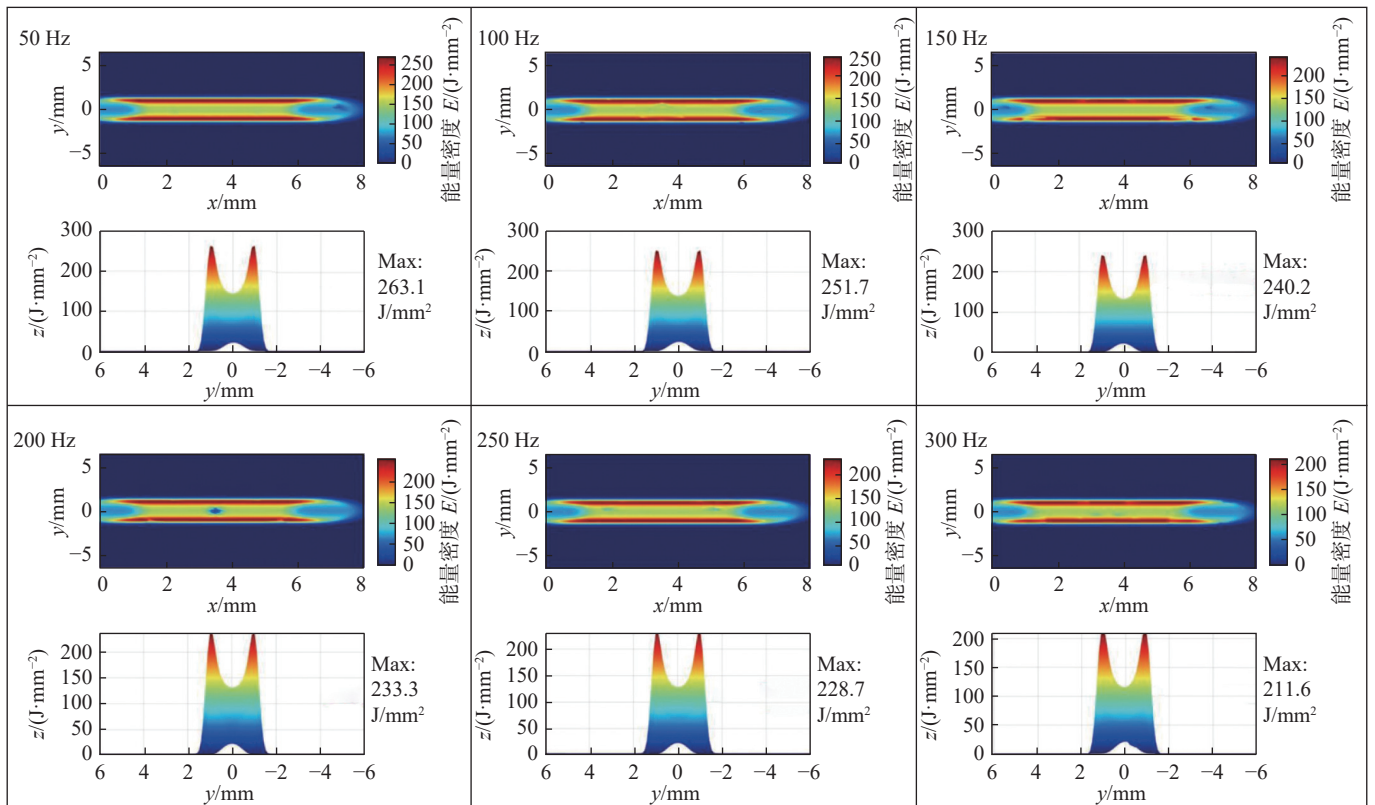


图 13 摆动频率对激光能量分布的影响

Fig. 13 Influence of oscillating frequency on laser energy distribution

形(图 6), 均匀的焊缝成形与稳定一致的能量分布状态存在必然联系。从图 13 中还可看出: 随着摆动频率的增加, 激光能量分布的峰值也随着降低, 结合不同频率下的单层焊道深宽比(图 14), 可知: 焊缝深宽比下降是由于摆动频率增加, 能量分布峰值下降产生的。

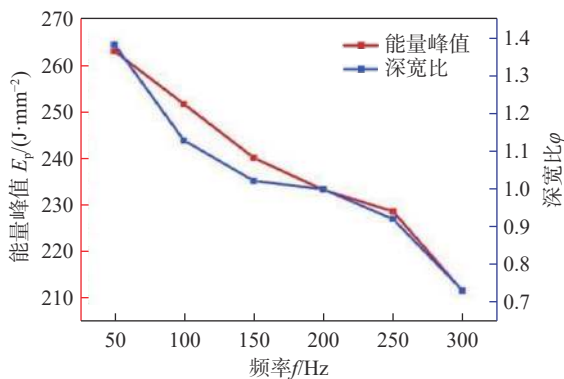


图 14 不同摆动频率下能量分布峰值与深宽比的关系

Fig. 14 Relation between peak energy distribution and penetration-width ratio under different oscillating frequency

不同摆动幅度下激光能量分布与坡口结合状态如图 15 所示, 当摆动幅度为 2.0 mm 时, 能量分布相

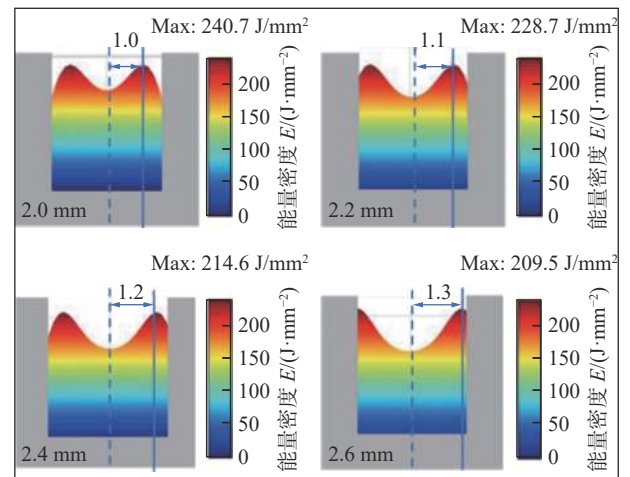


图 15 不同摆动幅度下激光在坡口内的空间分布状态

Fig. 15 Spatial distribution state of laser in groove under different oscillating amplitude

对集中, 大部分的激光能量作用于坡口底部, 结合成形情况(如图 9), 填充金属铺展不好是由于大部分能量作用于坡口底部, 而很少作用到侧壁; 当摆动幅度为 2.2 mm 时, 能量部分均匀作用于坡口底部及侧壁, 结合成形情况, 摆动幅度为 2.2 mm 时可以得到优质

的焊缝成形;当摆动幅度为 2.4 mm 时,作用于坡口侧壁的能量过多,结合成形情况,出现了烧边现象;当摆动幅度为 2.6 mm 时,更多的能量作用于坡口侧壁,结合成形情况,烧边现象更为严重。由上述分析,影响单层焊道表面成形质量的主要因素是摆动幅度,摆动幅度影响激光在窄间隙坡口内的空间分布状态从而影响填充金属在坡口内的铺展。因此要获得优质单层焊道表面成形,避免烧边的产生的同时获得铺展性良好的单层焊道,可以通过改变摆动幅度与窄间隙坡口尺寸合理匹配。

### 2.3 摆动参数对横焊过程中单层焊道气孔的影响

#### 2.3.1 摆动频率对单层焊道气孔缺陷的影响

图 16 为不同摆动频率下单层焊道的探伤底片。由图 16 可知:在摆动频率为 50 Hz 和 100 Hz 时有气孔产生;继续增加摆动频率至 150 Hz 后,气孔缺陷消失;继续增加摆动频率,皆没有气孔产生。采用 Image J 软件对探伤底片上的气孔进行测量,并计算气孔率。图 17 为摆动频率对气孔的影响。由图 17 可知:随着摆动频率的增加,单层焊道的气孔率降低;



图 16 不同摆动频率下单层焊道的探伤底片

Fig. 16 X ray inspection negative of single pass under different oscillating frequency

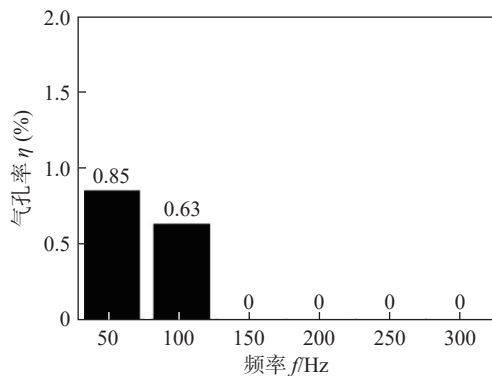


图 17 摆动频率对横焊气孔率的影响

Fig. 17 Influence of oscillating frequency on porosity of horizontal welding

当频率大于 150 Hz 后,没有气孔产生。

#### 2.3.2 摆动幅度对单层焊道气孔缺陷的影响

图 18 为在不同摆动幅度下单层焊道的探伤底片。由图 18 可知:不同摆动幅度下均没有明显的气孔产生,因此,摆动幅度对气孔缺陷的相关性较小。



图 18 不同摆动幅度下单层焊道的探伤底片

Fig. 18 X-ray inspection negative of single pass under different oscillating amplitude

#### 2.3.3 气孔缺陷形成过程及摆动抑制气孔机制

图 19 为窄间隙激光横焊过程气孔产生的示意图。当激光作用到坡口内的熔池时,产生匙孔,匙孔不稳定导致气泡,气泡受力上浮,但因激光焊熔池的凝固速度大于气泡的逸出速度,从而导致气孔的产生;但窄间隙横焊与平焊在气泡受力上浮过程中存在极大差异,在平焊过程中,气泡上浮,从而由熔池表面逸出;而在横焊过程中,气泡上浮后却因上方是侧壁的原因而无法逸出;因此,在窄间隙激光焊中,横焊相对于平焊更容易产生气孔缺陷。结合图 14 可知:随着摆动频率的增加,激光能量分布峰值降低,从而导致单层焊道深宽比降低,熔宽增加使气泡逃逸路径增加,熔深降低使得逃逸路程降低。

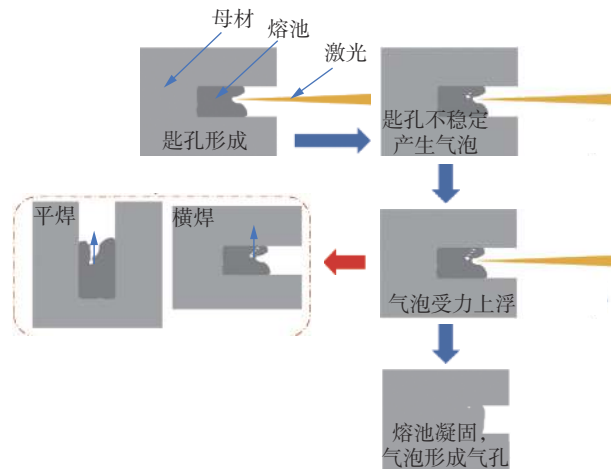


图 19 窄间隙激光横焊过程中气孔产生示意图

Fig. 19 Schematic diagram of porosity generation in narrow gap laser horizontal welding process

## 2.4 高强钢窄间隙激光填丝横焊工艺验证

结合上述摆动参数对单层焊道的影响规律,通过7道窄间隙激光填丝焊实现了20 mm厚10Ni5CrMoV高强钢的焊接(摆动焊接参数见表2)。图20和图21分别为20 mm厚高强钢窄间隙激光摆动焊接接头横截面和焊缝探伤底片。由图20和图21可知:该摆动参数可在保证优质焊缝形成的基础上有效抑制气孔缺陷的产生。

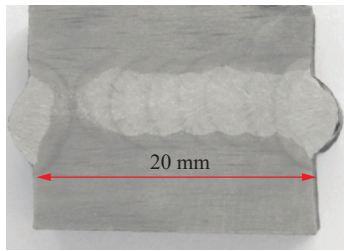


图20 20 mm厚高强钢窄间隙激光摆动焊接接头横截面

Fig. 20 Cross section of narrow gap laser oscillating welded joint of 20 mm thick high strength steel



图21 20 mm厚高强钢窄间隙摆动激光焊缝探伤底片

Fig. 21 X-ray inspection negative of narrow gap laser oscillating weld of 20 mm thick high strength steel

## 3 结论

(1)当使用常规激光实现高强钢窄间隙激光横焊时,焊道成形差并存在气孔缺陷;而使用摆动激光可以很好地改善窄间隙激光横焊单层焊道的表面成形质量并抑制横焊过程中气孔缺陷。

(2)单层焊道的表面成形质量主要取决于摆动幅度,与摆动频率的相关性较小,要获得优质单层焊道表面成形,避免烧边产生的同时获得铺展性良好的单层焊道,需改变摆动幅度使其与坡口尺寸合理匹配,该次试验中最优摆动幅度为2.2 mm。

(3)单层焊道的气孔产生及抑制主要取决于摆动频率大小,与摆动幅度相关性较小。该次试验中摆动频率大于150 Hz即可避免气孔产生。

(4)窄间隙激光焊接中横焊相对于平焊具有更高的气孔倾向,摆动激光可以抑制窄间隙横焊过程中气孔缺陷产生的主要原因是频率增加使单层焊道深宽比降低,熔宽增加使气泡逃逸路径增加,熔深降低使得逃逸路程降低。

## 参考文献

- [1] TÜMER M, SCHNEIDER-BRÖSKAMP C, ENZINGER N. Fusion welding of ultra-high strength structural steels – a review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 82: 203 – 229.
- [2] 李风波, 潘川, 杨文华, 等. 海洋工程用高强钢焊接技术研究现状及发展趋势[J]. *金属加工(热加工)*, 2021(8): 35 – 38. LI Fengbo, PAN Chuan, YANG Wenhua, et al. Research status and development trend of welding technology for high strength steel used in marine engineering[J]. *MW Metal Forming*, 2021(8): 35 – 38.
- [3] 吴超. 船舶舾装设计与制造效率提高方法研究[J]. *船舶物资与市场*, 2024, 32(1): 55 – 57. WU Chao. Research on the method of improving the design and manufacturing efficiency of ship outfitting[J]. *Marine Equipment/Materials & Marketing*, 2024, 32(1): 55 – 57.
- [4] 夏镇磊. 船舶焊接与结构设计优化分析[J]. *船舶物资与市场*, 2023, 31(11): 8 – 10. XIA Zhenlei. Optimization analysis of ship welding and structural design[J]. *Marine Equipment/Materials & Marketing*, 2023, 31(11): 8 – 10.
- [5] 罗哲, 乔东旭, 王亚奇, 等. 船舶焊接与结构设计优化分析[J]. *船舶物资与市场*, 2023, 31(3): 19 – 21. LUO Zhe, QIAO Dongxu, WANG Yaqi, et al. Optimization analysis of ship welding and structural design[J]. *Marine Equipment/Materials & Marketing*, 2023, 31(3): 19 – 21.
- [6] RAMAKRISHNA R V S M, AMRUTHA P H S L R, RAHMAN RASHID R A, et al. Narrow gap laser welding (NGLW) of structural steels—a technological review and future research recommendations[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(7-8): 2277 – 2300.
- [7] 滕彬, 范成磊, 徐锴, 等. 厚板窄间隙焊接技术研究现状与应用进展[J]. *焊接学报*, 2024, 45(1): 116 – 128. TENG Bin, FAN Chenglei, XU Kai, et al. Research status and application progress of narrow gap welding technology for thick plates[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2024, 45(1): 116 – 128.
- [8] 曹浩. 大厚度高强钢板窄间隙激光摆动填丝焊接工艺研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2020. CAO Hao. Narrow gap scanned laser with filling wire welding of thick and high strength steel [D]. Beijing, China: China Academy of Machinery Science and Technology, 2020.
- [9] LI Junzhao, SUN Qingjie, KANG Kexin, et al. Process stability and parameters optimization of narrow-gap laser vertical welding with hot wire for thick stainless steel in



- nuclear power plant[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 123: 105921.
- [10] CHANG Baohua, YUAN Zhang, PU Haitao, et al. A comparative study on the laser welding of Ti6Al4V alloy sheets in flat and horizontal positions[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(4): 376.
- [11] SHEN Xianfeng, LI Lin, GUO Wei, et al. Comparison of processing window and porosity distribution in laser welding of 10 mm thick 30CrMnSiA ultrahigh strength between flat (1G) and horizontal (2G) positions[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(2): 022418.
- [12] LEI Zhen, CAO Hao, CUI Xiufang, et al. Analysis of welding solidification crack in narrow gap laser welding of high-strength steel[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119: 4177 – 4190.
- [13] LONG Jian, ZHANG Linjie, ZHUANG Mingxiang, et al. Narrow-gap laser welding with beam wobbling and filler wire and microstructural performance of joints of thick TC4 titanium alloy plates[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152: 108089.
- [14] LIN Shi, XIN Li, JIANG Laihege, et al. Numerical study of keyhole-induced porosity suppression mechanism in laser welding with beam oscillation[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2021, 26(5): 349 – 355.
- [15] JIANG Laihege, SHI Lin, LU Yang, et al. Effects of sidewall grain growth on pore formation in narrow gap oscillating laser welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 156: 108483.
- [16] 李军兆. 316L 不锈钢窄间隙激光焊接熔池动态行为及电磁调控特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
LI Junzhao. Study on dynamic molten pool behaviour and electromagnetic manipulation characteristics in narrow gap laser welding of 316L stainless steel[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [17] FU Juan, ZHAO Yong, ZOU Jiasheng, et al. Influence of the magnetic field on the melting and solidification behavior of narrow-gap laser welding with filler wire[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 123(3-4): 1123 – 1131.
- [18] 马生翀. 超声辅助窄间隙激光填丝熔池成形及等离子体动态特征研究 [D]. 江苏 镇江: 江苏科技大学, 2019.  
MA Shengchong. Study on the fusion forming and plasma dynamic characteristics in ultrasonic-assisted narrow-gap laser welding with filler wire [D]. Zhenjiang, Jiangsu, China: Jiangsu University of Science and Technology, 2019.
- [19] PHAONIAM R, SHINOZAKI K, YAMAMOTO M, et al. Development of a highly efficient hot-wire laser hybrid process for narrow-gap welding—welding phenomena and their adequate conditions[J]. *Welding in the World*, 2013, 57: 607 – 613.
- [20] 夏佩云, 封小松, 王春明, 等. 激光摆动焊接工艺参数对不锈钢焊缝成形与气孔率的影响 [J]. *焊接学报*, 2023, 44(4): 39 – 44.  
XIA Peiyun, FENG Xiaosong, WANG Chunming, et al. Effect of parameters on weld formation and porosity of stainless steel in laser oscillating welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(4): 39 – 44.
- [21] 曹浩, 雷振, 黄瑞生, 等. 激光摆动焊接工艺参数对高强钢气孔率和焊缝成形的影响 [J]. *焊接*, 2019(4): 39 – 43.  
CAO Hao, LEI Zhen, HUANG Ruisheng, et al. Effects of laser swing welding parameters on porosity and weld formation of high strength steel[J]. *Welding & Joining*, 2019(4): 39 – 43.
- [22] 徐楷昕, 雷振, 黄瑞生, 等. 摆动工艺对钛合金窄间隙激光填丝焊缝成形及气孔率的影响 [J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 143 – 151.  
XU Kaixin, LEI Zhen, HUANG Ruisheng, et al. Effects of oscillation parameters on weld formation and porosity of titanium alloy narrow-gap laser wire filling welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 143 – 151.
- [23] 邹吉鹏, 李连胜, 宫建锋, 等. 铝合金厚板激光扫描填丝焊接气孔抑制 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(10): 43 – 47, 66.  
ZOU Jipeng, LI Liansheng, GONG Jianfeng, et al. Aluminum alloy thick plate laser scanning wire filling welding porosity suppression[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(10): 43 – 47, 66.

第一作者: 武震东, 硕士研究生; 主要从事激光焊接方面的研究; [wuzhendong2000@163.com](mailto:wuzhendong2000@163.com)。

通信作者: 黄瑞生, 博士, 正高级工程师, 博士研究生导师; 主要从事激光焊接技术与装备的科研工作; [huangrs8@163.com](mailto:huangrs8@163.com)。

(编辑: 王龙权)

#### 本文引用格式:

武震东, 黄瑞生, 曹浩, 等. 光束摆动对窄间隙激光横焊焊缝成形及气孔的影响[J]. *焊接*, 2025(1): 8 – 16.

WU Zhendong, HUANG Ruisheng, CAO Hao, et al. Effect of beam oscillating on formation and porosity of weld by narrow gap laser horizontal welding[J]. *Welding & Joining*, 2025(1): 8 – 16.