

304L 不锈钢扫描激光搭接焊熔池流动与焊缝成形研究

杨晖, 李芳*, 华学明, 陈科

上海交通大学材料科学与工程学院激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240

摘要 针对 MARK III 型液化天然气 (LNG) 船围护系统中的 304L 不锈钢波纹板搭接接头进行了圆形扫描激光焊接工艺研究。对于圆形扫描激光焊接的搭接接头, 其下板焊缝边缘存在咬边, 且在较大扫描幅度和较高扫描频率下咬边现象尤其明显。通过高速摄影发现, 焊接过程中圆形扫描轨迹内部存在未熔化区域。激光斑点除自身的扫描运动外还叠加了沿焊接方向的移动, 随着扫描路径的重复叠加, 在扫描激光焊接熔池的内部, 未熔化区域逐渐减小, 最终达到稳定状态。当扫描幅度或频率提高时, 单位长度母材吸收的激光能量减小, 熔池温度降低, 当前扫描周期下形成的熔池前沿快速凝固, 从而导致未熔化区尺寸无法进一步缩小。当扫描幅度降至 1.5 mm 或者扫描频率降至 50 Hz 时, 未熔化区域较小甚至完全消失, 咬边现象也随之消失。

关键词 激光技术; 扫描激光焊接; 咬边; 搭接焊; 圆形扫描; 304L 不锈钢

中图分类号 TG44 **文献标志码** J

DOI: 10.3788/CJL202249.2202004

1 引言

使用 Mark III 薄膜型围护系统的液化天然气 (LNG) 船是运输液化气的专用船舶, 具有良好的应用前景。在 LNG 船的 Mark III 薄膜型围护系统中, 1.2 mm 厚的 304L 不锈钢波纹板被焊接成密闭空间, 从而形成主屏蔽层。目前主要采用钨极氩弧焊或等离子弧焊, 焊接速度较慢, 生产效率低。在融合了激光焊接技术^[1]优点的基础上, 扫描激光焊接技术^[2]通过快速振动振镜, 调节入射激光位置, 扫描速度较快且间隙容忍度较高^[3], 可改善焊接过程中的稳定性和焊缝成形等^[4], 应用越来越广泛。因此, 为了提高波纹板的焊接效率, 本文针对 304L 不锈钢搭接接头扫描激光焊接展开了研究。王慧^[5]在研究 0.7 mm 厚的 304 不锈钢薄板激光焊时发现, 虽然随着激光功率的增加, 焊缝的熔宽与截面积都会增加, 但是当功率过大时, 焊缝上表面出现凹陷。Hao 等^[6]在研究 2 mm 厚的 AZ31 镁合金的扫描激光焊接时发现, 当扫描频率或扫描幅度过大时会形成咬边。Wang 等^[7]研究了三种不同模式 (线形、圆形、∞形) 的扫描激光焊下 8 mm 厚 5A06 铝合金对接的焊接效果, 发现焊缝表面形貌虽然好于普通激光焊接, 但仍然会存在气孔和咬边等缺陷, 缺陷严重程度按照线形、圆形、∞形顺序递减。扫描激光焊接涉及到的工艺参数很多, 如扫描轨迹、幅度、频率、激光功率^[5-14]、离焦量、入射角^[15]等, 它们都会对焊缝成形产生影响, 不合适的工艺参数会使焊缝产生宏观缺陷。

本文针对 304L 不锈钢搭接接头进行了圆形扫描激光焊接研究, 借助高速摄影系统实时观察了扫描激光焊接熔池从建立到稳定的动态过程, 分析了扫描激光工艺参数对熔池形态和流动行为以及焊缝成形的影响。本研究为搭接接头扫描激光焊接的工艺参数选择提供了工程指导。

2 试验材料及方法

试验所用的激光器为光纤激光器, 激光功率最大可至 3000 W, 在离焦量为 0 时光斑直径为 0.3 mm。所使用的激光头可以实现直线、圆形等摆动路径。试验母材为 304L 不锈钢薄板, 尺寸为 150 mm × 50 mm × 1.2 mm。焊接接头为搭接形式, 搭接距离为 10 mm。激光入射角为 0°, 激光焦平面位于上板上表面, 焊接速度为 1 m/min。在试验过程中, 采用高速摄影系统观察焊接熔池, 该系统由高速摄影相机和照明系统组成, 拍摄时与工件平面成 30° 夹角, 拍摄帧频为 5000 frame/s, 试验装置示意图如图 1 所示。本试验采用圆形扫描路径进行激光焊接, 主要研究扫描幅度、扫描频率及激光功率的影响。在同样的激光功率下, 熔深随扫描幅度的减小而变大, 因此为了保证熔深大于 0.5 mm 且工件不熔透, 根据扫描直径的改变对应调整激光功率, 试验参数如表 1 所示。

焊接试板后, 垂直于焊缝方向切取焊缝横截面以制备金相试样, 在研磨和抛光之后, 采用光学显微镜 (OM) 进行观察, 并测量焊缝宏观尺寸。

收稿日期: 2021-12-06; 修回日期: 2022-01-10; 录用日期: 2022-02-28

基金项目: 工业和信息化部高技术船舶科研计划 (2018 函 473 号)、工业和信息化部高技术船舶科研计划 (2020 函 313 号)

通信作者: *lifang302@sjtu.edu.cn

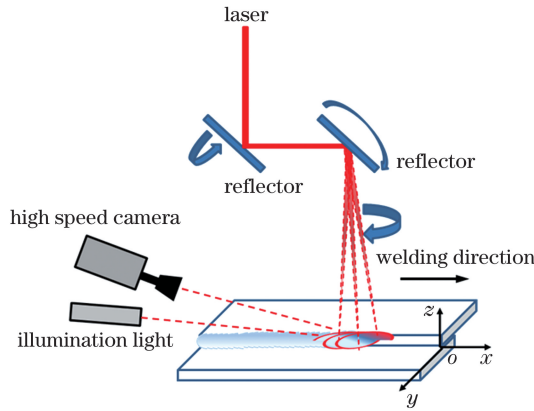


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of test device

表 1 圆形扫描激光焊接参数

Table 1 Parameters for circle scanning laser welding

Parameter	Value
Welding speed v_w / (m/min)	1
Laser power P / kW	1.0, 1.5, 1.8
Defocusing distance / mm	0
Scanning diameter D / mm	1.5, 2.0, 2.5
Scanning frequency f / Hz	50, 100, 150, 200, 250
Laser incident angle / ($^\circ$)	0

3 试验结果与分析

3.1 圆形扫描激光搭接接头成形

不同圆形扫描工艺参数下焊缝的宏观金相照片如图 2 所示。搭接接头的焊缝成形示意图如图 3 所示, 其中 S_n 为喉深, L 为熔宽, U_w 为咬边的宽度, U_d 为咬边的深度, p 为下板的熔深。从扫描激光搭接接头横截面的金相照片中可以看出, 上板与下板的熔合线并不完全是连续的, 在两块不锈钢板的搭接界面处存在一段水平熔合线, 以上板熔合线与搭接界面的接触外沿位置为起点测量熔宽。焊缝成形结果如表 2 所示, 其中 P 为激光功率, D 为圆形扫描直径, s 为咬边深度与下板熔深的比值。若无咬边, 则咬边宽度与咬边深度用“-”表示。

从焊缝的金相图和测量的数据中可以看出, 当扫描直径一定时, 随着激光扫描频率的增加, 焊缝熔深逐渐减小。从表 2 中可以看到, 当扫描直径为 2.5 mm, 扫描频率增加到 200 Hz 及以上时, 所得到的接头焊缝熔深小于 0.5 mm, 低于要求。对于圆形扫描方式下的搭接接头, 其焊缝成形会出现咬边缺陷。如图 4 所示, 在一定的扫描直径下, s 的值会随着扫描频率的减小而减小; 当扫描频率一定时, s 的值随着扫描直径的

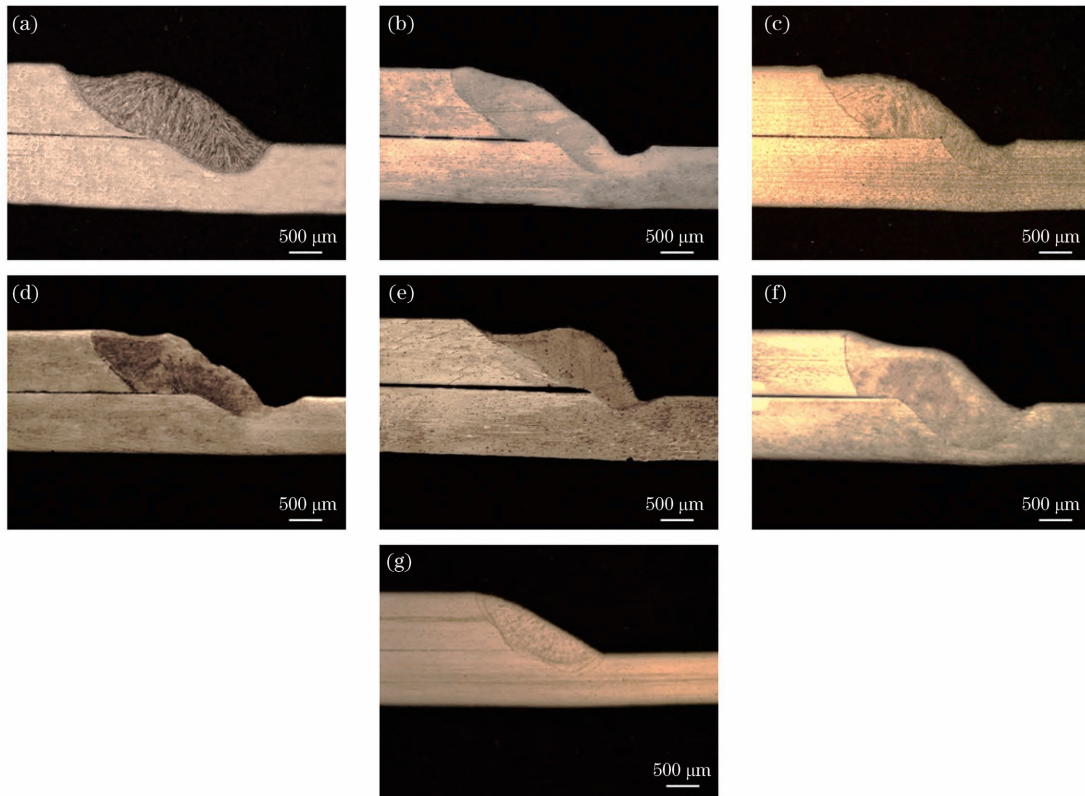


图 2 不同扫描参数下的焊缝横截面宏观形貌。(a) $f=50$ Hz, $P=1.8$ kW, $D=2.5$ mm; (b) $f=100$ Hz, $P=1.8$ kW, $D=2.5$ mm; (c) $f=150$ Hz, $P=1.8$ kW, $D=2.5$ mm; (d) $f=200$ Hz, $P=1.8$ kW, $D=2.5$ mm; (e) $f=250$ Hz, $P=1.8$ kW, $D=2.5$ mm; (f) $f=200$ Hz, $P=1.5$ kW, $D=2$ mm; (g) $f=200$ Hz, $P=1$ kW, $D=1.5$ mm

Fig. 2 Macro-morphologies of weld cross sections under different scanning parameters. (a) $f=50$ Hz, $P=1.8$ kW, $D=2.5$ mm; (b) $f=100$ Hz, $P=1.8$ kW, $D=2.5$ mm; (c) $f=150$ Hz, $P=1.8$ kW, $D=2.5$ mm; (d) $f=200$ Hz, $P=1.8$ kW, $D=2.5$ mm; (e) $f=250$ Hz, $P=1.8$ kW, $D=2.5$ mm; (f) $f=200$ Hz, $P=1.5$ kW, $D=2$ mm; (g) $f=200$ Hz, $P=1$ kW, $D=1.5$ mm

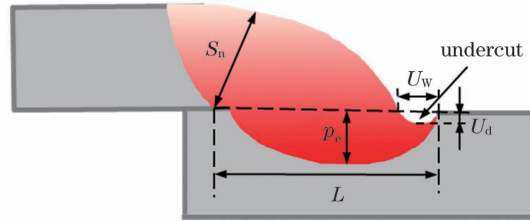


图 3 扫描激光搭接接头的焊缝成形示意图

Fig. 3 Weld forming diagram of scanning laser overlap joint

表 2 扫描激光搭接接头的焊缝成形结果

Table 2 Weld forming results of scanning laser overlap joint

No	f /Hz	P /kW	D /mm	L /mm	S_n /mm	p_c /mm	U_w /mm	U_d /mm	s	Morphology
1	50	1.8	2.5	2.28	1.01	0.59	—	—	0	Good
2	100	1.8	2.5	2.15	0.87	0.59	0.76	0.22	0.37	Undercut
3	150	1.8	2.5	2.17	1.06	0.57	0.59	0.18	0.32	Undercut
4	200	1.8	2.5	1.69	1.09	0.41	0.80	0.21	0.51	Undercut + insufficient penetration
5	250	1.8	2.5	1.20	0.91	0.30	0.48	0.15	0.50	Undercut + insufficient penetration
6	200	1.5	2	1.89	0.94	0.73	0.54	0.11	0.15	Undercut
7	200	1	1.5	1.82	0.89	0.54	—	—	0	Small width

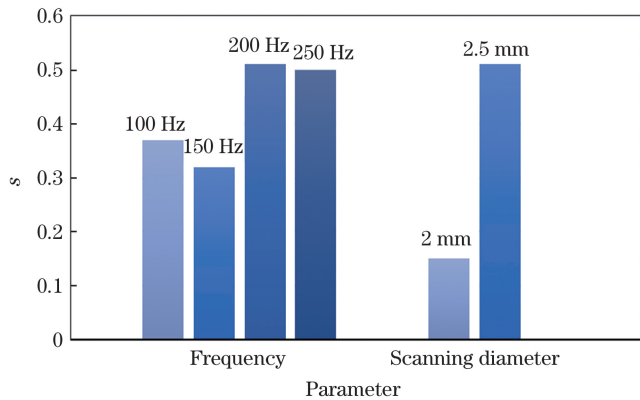


图 4 不同扫描参数对焊缝成形的影响

Fig. 4 Influence of different scanning parameters on weld forming

减小而减小。因此,减小扫描频率或扫描直径可以改善咬边问题。

3.2 圆形扫描激光焊接熔池的流动分析

在圆形扫描激光焊接过程中,初始周期的高速摄影照片如图 5 所示。在激光照射的位置形成了小孔,并喷发出等离子体,如图 5(b)~(d),激光斑点沿着预

设的扫描路径运动。由于激光斑点移动速度远大于焊接速度,一个扫描周期内所形成的熔池没有凝固,其形状为与圆形扫描路径接近的椭圆。对于一个扫描周期内未熔化的区域,需要通过持续的能量输入与熔池推进将其熔化。

随着激光沿焊接方向(x 方向)的前进,当前扫描周期下形成的新熔池后沿与之前扫描产生的熔池前沿重合,最终扫描激光焊接的熔池达到稳态。图 6 为三个不同周期下的高速摄影图片以及熔池局部放大图。其中,当扫描直径为 1.5 mm 时,随着激光斑点沿焊接方向的运动,扫描轨迹内部的未熔化区域逐渐减小,最终达到稳态,形成了完整的熔池。当扫描直径为 2.5 mm 时,随着激光斑点沿焊接方向的运动,熔池逐渐达到稳态,此时熔池中心部分存在明显的未熔化区域。

从拍摄的高速摄影图片中发现,在圆形激光扫描过程中,激光光斑的运动带动熔化液体运动,并且激光斑点在熔池前沿与后沿处的运动方向不一致。在熔池的前沿,激光斑点从上板向下板方向运动,上板熔化的金属随着激光的运动形成飞溅,扫描频率为

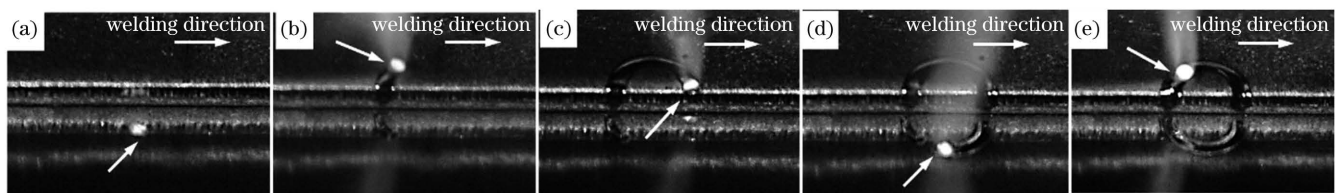


图 5 圆形扫描激光焊接过程中初始周期的高速摄影照片(箭头所指为激光斑点)

Fig. 5 High-speed photographs in initial scanning period during circular scanning laser welding with laser spot indicated by arrow

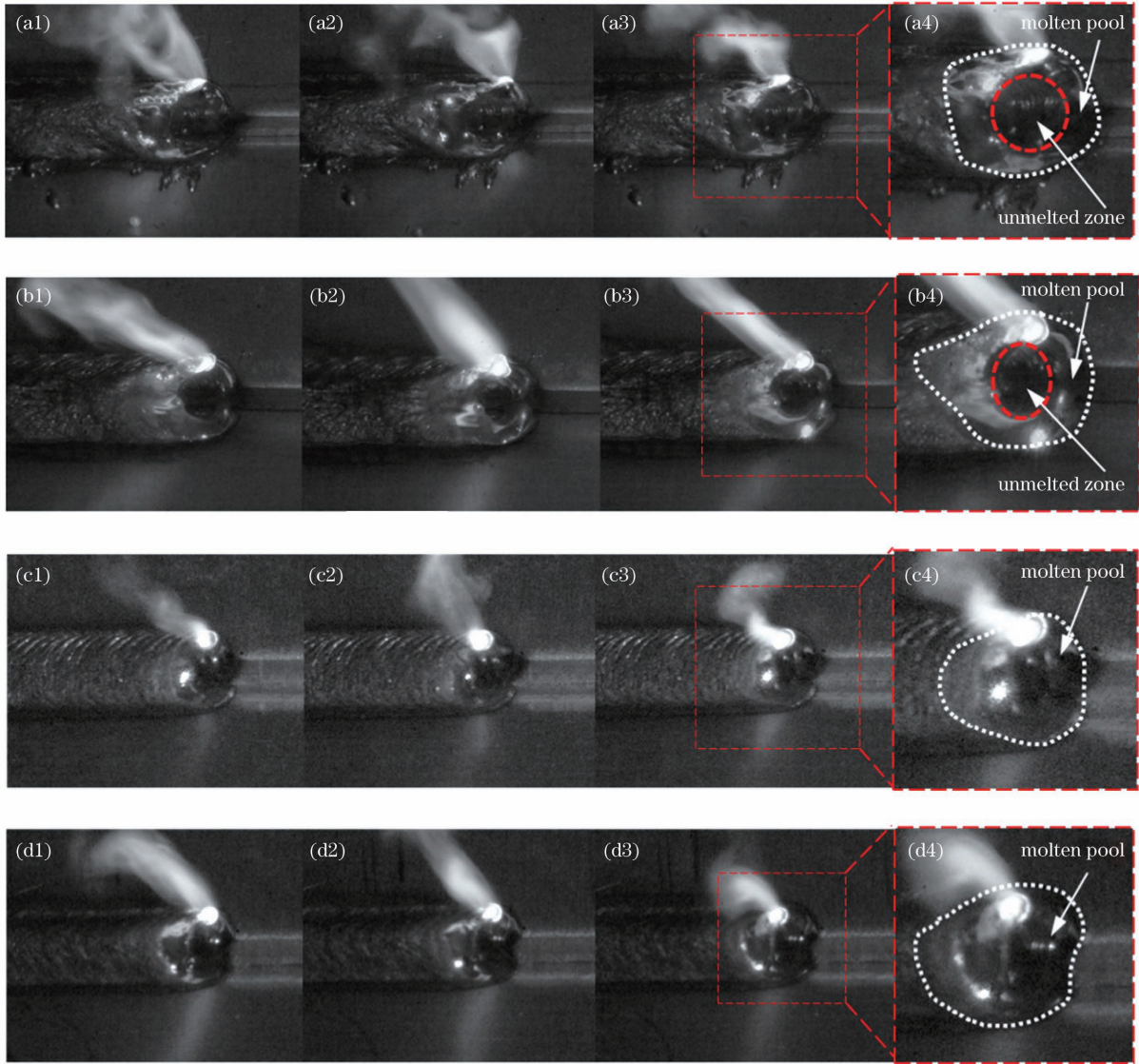


图 6 不同圆形扫描参数下的熔池形貌高速摄影照片。(a1)~(a4) $f=50\text{ Hz}$, $D=2.5\text{ mm}$; (b1)~(b4) $f=200\text{ Hz}$, $D=2.5\text{ mm}$; (c1)~(c4) $f=50\text{ Hz}$, $D=1.5\text{ mm}$; (d1)~(d4) $f=200\text{ Hz}$, $D=1.5\text{ mm}$

Fig. 6 High-speed photographs of molten pools under different circular scanning parameters. (a1)~(a4) $f=50\text{ Hz}$, $D=2.5\text{ mm}$; (b1)~(b4) $f=200\text{ Hz}$, $D=2.5\text{ mm}$; (c1)~(c4) $f=50\text{ Hz}$, $D=1.5\text{ mm}$; (d1)~(d4) $f=200\text{ Hz}$, $D=1.5\text{ mm}$

200 Hz、扫描幅度为 2.5 mm 时的高速摄影照片如图 7 所示,其中 t_0 为初始时刻。而在熔池的后沿,激光从下板向上板方向运动,使得下板的熔化金属随着光斑的运动被推向上板,如图 8 所示,虚线处为熔化金属流动时的边界线,熔化的金属随着光斑的运动而向上板方向推进。在扫描过程中的飞溅和下板熔池熔化金属

的向上流动的共同作用下,最终下板熔池内的熔化金属损失得不到及时的补充,从而在下板产生咬边。

3.3 圆形扫描激光焊缝咬边原因分析

图 9 所示为圆形扫描激光焊接过程中熔池的动态流动示意图。图 9(a)为初始扫描周期内的熔池高速摄影图片,其中 d 是单次激光照射熔化区域的宽度,

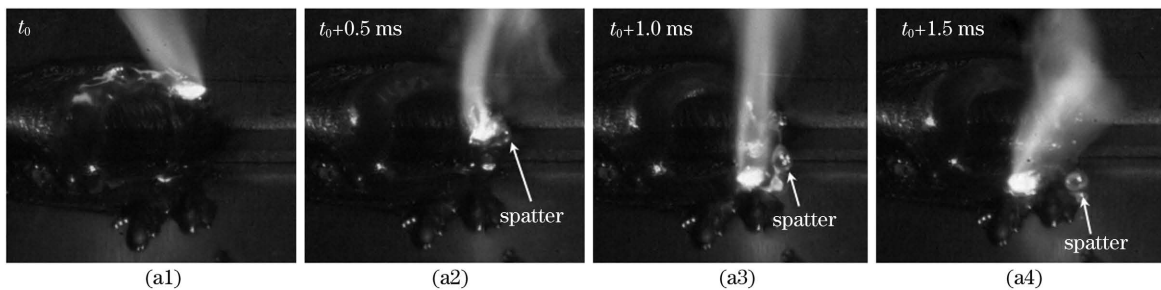


图 7 圆形扫描过程中的飞溅($f=200\text{ Hz}$, $D=2.5\text{ mm}$)

Fig. 7 Spatters during circular scanning ($f=200\text{ Hz}$, $D=2.5\text{ mm}$)

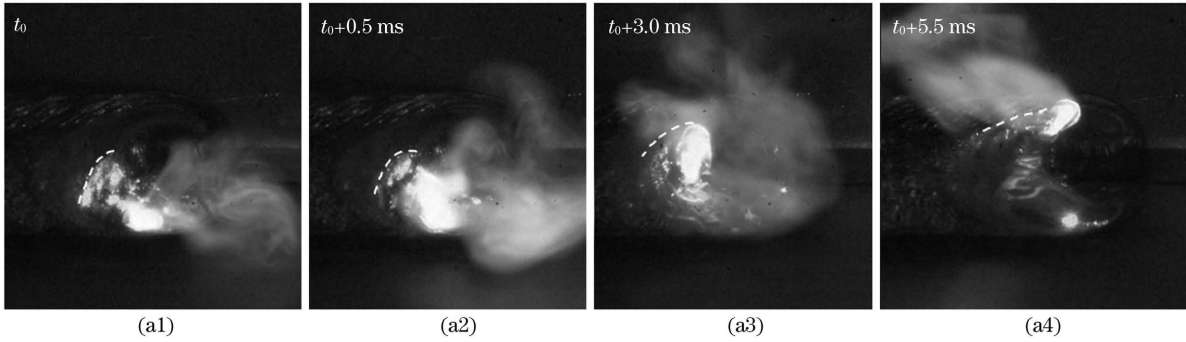


图 8 圆形扫描过程中熔池后沿处的熔化金属流动 ($f=50\text{ Hz}$, $D=2.5\text{ mm}$)

Fig. 8 Molten metal flow at back edge of molten pool during circular scanning ($f=50\text{ Hz}$, $D=2.5\text{ mm}$)

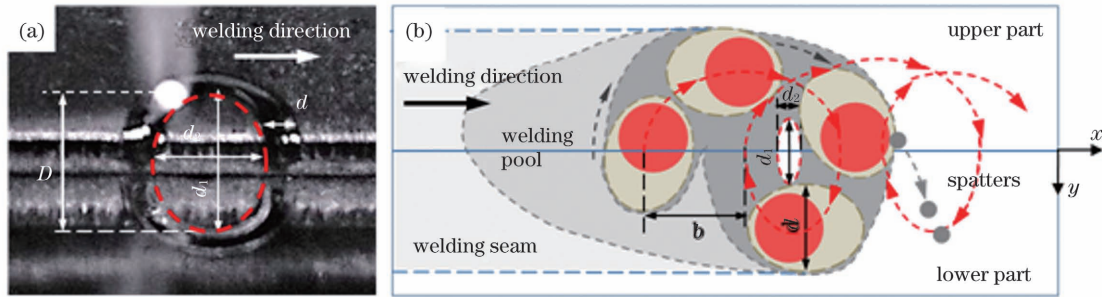


图 9 圆形扫描过程中熔池的动态流动。(a) 初始扫描周期的高速摄影照片；(b) 示意图

Fig. 9 Dynamic flow of molten pool during circular scanning. (a) High speed photography in initial scanning period; (b) schematic

与单位长度上的能量输入 p 有关。图 9(b) 为达到稳态后的熔池流动示意图, 其中 b 为相邻两个周期内扫描路径之间的距离。熔池内部未熔化区域的形状类似椭圆, 沿 y 方向的尺寸为 d_1 , 沿 x 方向的尺寸为 d_2 。具体的 d_1 、 d_2 、 d 、 b 的表达式为

$$b = \frac{v_w}{f}, \quad (1)$$

$$d_1 = D - d, \quad (2)$$

$$d_2 = D - d + \frac{b}{2} - nb, \quad (3)$$

$$d = kp, \quad (4)$$

式中: 焊接速度 v_w 在此试验中为固定值; n 为熔池达到稳态所经历的扫描周期数; k 为激光能量吸收系数, 与材料有关。单位长度上的激光能量 p 的表达式为

$$p = \frac{\eta P}{v(f, D)}, \quad (5)$$

式中: η 为热效率系数; v 为扫描激光的线速度, 在设置频率 f 和扫描直径 D 后由激光头自动调控。

从某个周期开始计, 在该扫描周期下形成的熔池前沿, 与 n 个周期后熔池的后沿重合, 这样就可以形成连续的熔池, 那么这就要求 n 个扫描周期内的扫描轨迹推进时间 t_n 小于熔池凝固的时间。 t_n 的表达式为

$$t_n = \frac{D - d}{bf} = \frac{D - d}{v_w}. \quad (6)$$

吴思根等^[16]通过有限元模拟, 发现在扫描激光焊接过程中, 扫描直径越大, 频率越高, 熔池的最高温度就越低, 因此熔池凝固所需的时间也会越少。此外, 在

扫描直径越大, 频率越高的情况下, 当前扫描周期下母材吸收到的能量越少, 进而母材的熔化量也越少。在扫描焊接过程中, 熔池前沿上板熔化金属随着激光的运动向下板方向流动, 当扫描幅度大、频率高时, 熔池凝固速度快, 凝固时间较短, 内部存在不熔化区, 如图 6 所示, 因而熔池前沿熔化金属向下流动的通道变窄, 向下流动的熔化金属会减少, 进而导致下板熔化金属量不足, 造成搭接焊缝下板咬边。

下面分析圆形扫描激光下的能量分布及其对焊缝成形的影响。圆形扫描时沿扫描路径, 激光能量分布在圆环上, 任意位置上的能量密度相同。将上板与下板的搭接缝面设为焊缝中心, 如图 1 中 $y=0$, 焊缝边缘与中心的距离为 $r=D/2$ 。在一个扫描周期中, 能量平均分布在一个圆环上, 这个圆环可表达为 $x^2 + y^2 = r^2$ 。为了简化计算, 取四分之一圆, 将激光斑点看作无直径的点, 即在 $0 \sim r$ 的范围内对 $x = \sqrt{r^2 - y^2}$ 曲线上的能量进行积分(在实际情况下, 由于激光斑点是有面积的, 即激光照射的位置一定会有能量吸收, 因此在 $y=0$ 处能量应该大于 0)。利用换元法求得能量分布 E 的表达式 (y 位于 $0 \sim r$ 的范围内)为

$$E = \int p d[\arcsin(y)], \quad (7)$$

$$E = \int p \times (r^2 - y^2)^{-0.5} dy. \quad (8)$$

根据式(7), 可以发现, 焊缝边缘处吸收到的激光能量更多, 即焊缝两侧能量较为集中, 导致熔化的母材更多, 与 Dewi 等^[17]的研究结果吻合。图 10 分别表示

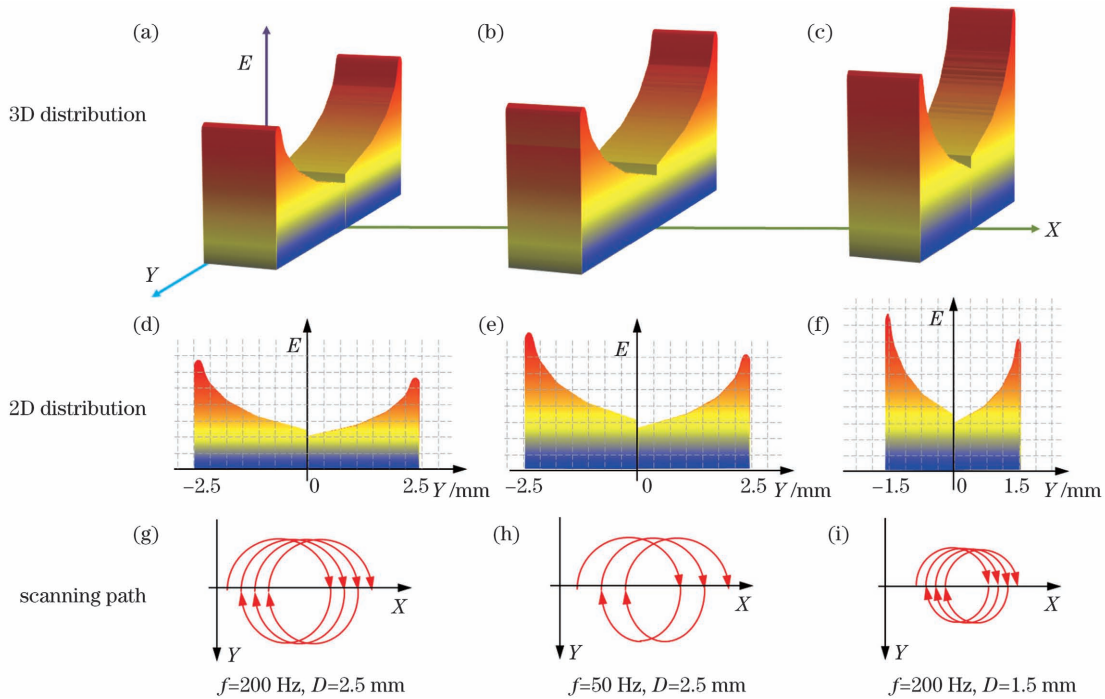


图 10 圆形扫描能量分布示意图

Fig. 10 Schematics of circular scanning energy distributions

高速摄影中三组焊接参数下的焊缝能量分布,其中 X 轴表示焊缝长度, Y 轴表示扫描幅度。

当频率更高时,激光单圈行走的速度更快,即 v 更大,因此 p 更小,即 E 更小;同理,扫描直径更大时,意味着 r 更大,同时激光单圈行走的距离更长,速度 v 更大,因此 p 更小,即 E 更小。 E 是激光能量在焊缝横截面方向的分布, E 越小,意味着母材吸收的能量越少,能熔化的母材越少,熔池温度低,熔池凝固快,熔池存在未熔化区,熔池流动越容易受到阻碍,这也是为什么扫描频率更高、扫描直径更大时,未熔化区域面积更大,熔池流动情况更差。

如图 10 所示,当扫描直径为 1.5 mm、扫描频率为 200 Hz 时, E 最大;当扫描直径为 2.5 mm、扫描频率为 200 Hz 时, E 最小;此外,由于激光焦平面位于上板上平面,因此同样的功率时上板吸收到的能量比下板多, E 会略大。Jiang 等^[18]发现,在特定的焊接速度和激光功率下,随着振荡频率的增大,焊缝熔深减小。根据式(8)可知,在圆形扫描激光行走过程中,能量集中在焊缝两侧,焊缝中部吸收到的能量较低。以 $y \in (0, 0.2r)$ (即图 11 中 $P_0 \sim P_1$ 段)为例,其宽度为焊缝的 20%,但吸收的能量只有全部吸收能量的 13%;而当 $y \in (0.8r, r)$ (图 11 中 $P_2 \sim P_3$ 段)时,焊缝边缘部位宽度只占焊缝的 20%,却吸收了全部能量的 41%。因此可以认为,焊缝中部区域熔化的母材远少于两侧边缘部位,在焊缝中心部位吸收能量不足的情况下,熔池温度进一步降低,熔池凝固快,导致熔池内部存在未熔化区域,同时熔池流动受阻,下板焊缝边缘会出现较为严重的咬边现象。

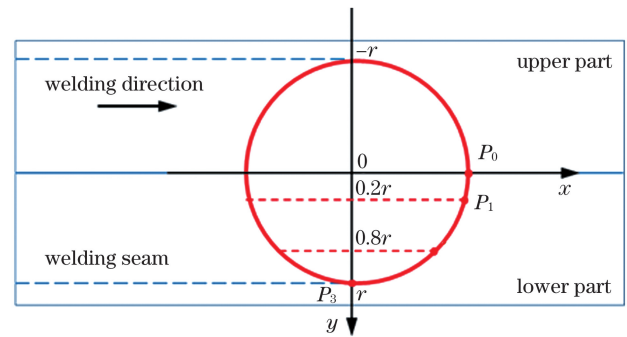


图 11 圆形扫描过程中的能量分布对比

Fig. 11 Comparison of energy distribution during circular scanning

4 结 论

利用圆形扫描激光焊接技术加工了 304L 不锈钢搭接接头,发现得到的接头在扫描频率较高、扫描幅度较大的情况下会出现咬边缺陷。通过高速摄影进行观察,发现在焊接过程中,熔池内部存在未熔化区域,阻碍了熔池流动。未熔化区域与激光搅拌作用的共同影响导致了咬边的形成。对能量分布进行分析后认为,未熔化区域的存在与圆形扫描激光的能量分布有关,在不同的焊接参数下,能量分布不同,未熔化区域的大小也不同。下一步的工作是对焊接过程中的温度场进行模拟,以有效得到焊接参数与接头温度场分布之间的关系。

参 考 文 献

- [1] 杜伟哲, 黄婷, 曹政, 等. AISI304 不锈钢箔振荡扫描激光微焊接工艺[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1102006.

- Du W Z, Huang T, Cao Z, et al. Galvanometer scanning laser-micro-welding of AISI304 stainless-steel foil[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1102006.
- [2] 陈晓宇, 王旭友, 周立涛, 等. 激光扫描焊接技术的研究现状[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2014(4): 6-11.
- Chen X Y, Wang X Y, Zhou L T, et al. The research status of laser scanning welding technology [J]. Welding Digest of Machinery Manufacturing, 2014(4): 6-11.
- [3] Stanciu E M, Pascu A, Roată I C. Edge fillet laser welding of AISI 304 stainless steel[J]. Solid State Phenomena, 2014, 216: 304-309.
- [4] 蔡创, 谢佳, 刘致杰, 等. 铝合金摆动激光-MIG 复合焊接特性及气孔控制[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1802002.
- Cai C, Xie J, Liu Z J, et al. Welding characteristics and porosity control of weaving laser-MIG hybrid welding of aluminum alloys [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1802002.
- [5] 王慧. 304 不锈钢激光焊接接头形貌与组织性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- Wang H. Study on morphology, microstructure and property of laser welded 304 stainless steel joints [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [6] Hao K D, Wang H K, Gao M, et al. Laser welding of AZ31B magnesium alloy with beam oscillation[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(3): 3044-3053.
- [7] Wang Z M, Oliveira J P, Zeng Z, et al. Laser beam oscillating welding of 5A06 aluminum alloys: Microstructure, porosity and mechanical properties [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 111: 58-65.
- [8] Müller A, Goecke S F, Rethmeier M. Laser beam oscillation welding for automotive applications[J]. Welding in the World, 2018, 62(5): 1039-1047.
- [9] Franciosa P, Serino A, Botros R A, et al. Closed-loop gap bridging control for remote laser welding of aluminum components based on first principle energy and mass balance[J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31(2): 022416.
- [10] Li J Z, Sun Q J, Liu Y B, et al. Melt flow and microstructural characteristics in beam oscillation superimposed laser welding of 304 stainless steel [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 629-637.
- [11] 毛帅. 5052 铝合金光纤激光扫描焊接工艺研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- Mao S. Study on fiber laser scanning welding of 5052 aluminum alloy [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [12] 王文华. 铝合金振荡扫描激光焊接数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- Wang W H. Numerical simulation of laser oscillating welding of aluminum alloy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [13] 刘海, 陈辉. 激光功率对异种钢激光焊接接头组织与性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2314007.
- Liu H, Chen H. Effect of laser power on microstructure and properties of dissimilar steel's laser welded joint [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2314007.
- [14] 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): 0602111.
- Xu K X, Lei Z, Huang R S, 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): 0602111.
- [15] 徐爱民, 汤超, 李周选, 等. 两种光束偏角下的铜-钢激光焊接工艺[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 1114004.
- Xu A M, Tang C, Li Z X, et al. Copper-steel laser welding process under two laser deflection angles [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 1114004.
- [16] 吴思根, 周昕宇, 蒋志伟, 等. 低频振荡扫描激光焊接铝合金薄板温度场数值模拟[J]. 应用激光, 2019, 39(3): 440-447.
- Wu S G, Zhou X Y, Jiang Z W, et al. Numerical simulation on the temperature field for low-frequency laser oscillation welding of aluminum alloy [J]. Applied Laser, 2019, 39(3): 440-447.
- [17] Dewi H S, Volpp J. Impact of laser beam oscillation strategies on surface treatment of microalloyed steel [J]. Journal of Laser Applications, 2020, 32(4): 042006.
- [18] Jiang Z G, Chen X, Li H, et al. Grain refinement and laser energy distribution during laser oscillating welding of Invar alloy [J]. Materials & Design, 2020, 186: 108195.

Research on Molten Pool Flow and Weld Formation of 304L Stainless Steel by Scanning Laser Overlap Welding

Yang Hui, Li Fang^{*}, Hua Xueming, Chen Ke

Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract

Objective The 304L stainless steel membrane sheets in the MARK III LNG containment system are extensively applied, which should be connected by welding in the form of fillet joint. In practical production, plasma arc welding (PAW) is more employed in the joint production. However, the production efficiency is low. So it is considered to apply laser welding in the production to increase the welding speed and enhance the production efficiency. Thus, several investigations are necessary for the application.

In this research, the flow of molten pool and weld formation in 304L stainless steel fillet welding by the circular scanning laser are investigated. Thus, the reason why undercut occurs and how various welding parameters affect its appearance are highlighted, which contributes to preventing undercut from occurring.

Methods In this study, 304L stainless steel sheets whose depth is 1.2 mm are used. A single factor experiment is carried out to study the influence on the formation of the weld by different welding parameters. Among all of the welding parameters, scanning amplitude and scanning frequency are considered to have a substantial effect during the welding process, so the high-speed photography is employed to study the impact of these parameters on the molten pool's fluid

flow, which is employed to explain the formation of weld with the molten pool solidification and the energy distribution in circular scanning.

Results and Discussions The molten pool's dynamic process from the establishment to stabilization during circular scanning laser welding is observed using high-speed photography. The experimental findings reveal an undercut on the bottom plate welded by circular scanning mode, particularly with larger scanning amplitude, and larger undercut. The scanning laser moves along the preset trajectory, and the high-speed photographic findings reveal a molten pool forming along the moved path of the laser spot during the first scanning period, while unmelted solid remains inside the circular area. In a single scanning cycle, there is a melted loop and an unmelted round area (Fig. 5). The moving of the laser spot superimposes the moving along the welding direction except for its scanning movement, and then the unmelted area gradually decreases because of repeated stacking of the molten pool and eventually reaches a steady-state (Fig. 6). In aggregate, the laser energy is concentrated on both sides of the weld, while the energy in the central region is low (Fig. 10). Under small scanning amplitudes, the unmelted area disappears while it is always there under large scanning amplitudes. Under the scanning laser's agitation, molten metal of the upper plate spatters at the molten pool's front due to the impetus from the laser (Fig. 7), which also leads to the lower plate's molten metal flowing to the upper at the molten pool's trailing end (Fig. 8). Meanwhile, as the scanning amplitude increases, the absorbed laser energy per unit length decreases, leading to the lower molten pool temperature. Then the molten pool's front solidifies fast, and thus the unmelted area can not be further reduced. Therefore, the lower plate's molten metal cannot not be supplemented, which leads to the undercut's occurrence.

Conclusions The following conclusions can be drawn from the above experiments.

First, the penetration depth and the degree of undercut of the circular scanning laser overlap joint are negatively correlated with scanning frequency. When other welding parameters are fixed, the higher the scanning frequency is, the smaller the penetration depth is. While welding, the proposed scanning frequency is below 200 Hz, and the scanning amplitude is below 2 mm.

Second, there is base metal loss including spatters or evaporation during welding, which requires melted metal from the upper sheet to supplement. When the scanning amplitude is large or the frequency is high, the molten pool's solidification speed is fast and the solidification time is short, and then the downward flow channel of molten metal at the molten pool's front becomes narrower, which leads the downward flow of molten metal to be reduced. Thus, the molten metal at the lower side is not enough and the undercut occurs.

Third, the unmelted area in the molten pool is caused by the energy distribution in the circular scanning. The laser energy is concentrated on both sides of the weld, while the energy in the central region is low. When the scanning amplitude is large (more than 1.5 mm) or the frequency is high (200 Hz), the molten pool's temperature is low, so the molten pool solidifies fast, creating a large unmelted zone, and then the undercut intensifies.

Key words laser technique; scanning laser welding; undercut; overlap welding; circular scanning; 304L stainless steel sheet