

# 光束倾角对激光深熔焊 304 不锈钢焊缝力学性能及熔池流动的影响

肖先锋, 卢聪, 周佳威, 李玉龙, 付艳恕  
(南昌大学, 先进制造学院, 南昌, 330031)

**摘要:** 在激光深熔焊接中光束倾角会直接影响匙孔形态, 光束倾角对熔池流动也具有一定的影响。采用激光深熔焊接白板试验结合“半三明治”熔池流动直接观测试验, 以激光倾角作为变量, 研究其对 304 不锈钢激光深熔焊接焊缝力学性能及熔池流动的影响。结果表明, 在焊缝的力学性能上, 不同激光倾角对焊缝上、中部的影响差异性较小, 对下部的影响较大, 焊缝底部拉伸件出现较多气孔缺陷, 正激光入射角下的焊缝抗拉强度和断后伸长率小于负激光入射角。正激光入射角下“上小下大”的匙孔形貌使其底部易产生涡流, 不利于气泡的排出, 且匙孔坍塌频率较负激光入射角大, 导致熔池稳定性较差, 焊缝气孔缺陷的形成概率呈现为正激光入射角高于负激光入射角态势。

**创新点:** (1) 采用“半三明治”方法, 直接观测激光深熔焊接熔池流动和匙孔动态。  
(2) 揭示光束倾角对激光深熔焊接焊缝力学性能影响机制。

**关键词:** 激光深熔焊接; 光束倾角; 熔池流动; 力学性能

中图分类号: TG 456.7 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20230715001

## Effect of beam incident angle on weld mechanical properties and melt pool flow behavior in laser deep penetration welding of 304 stainless steel

XIAO Xianfeng, LU Cong, ZHOU Jiawei, LI Yulong, FU Yanshu  
(School of Advanced Manufacturing, Nanchang University, Nanchang, 330031, China)

**Abstract:** In laser deep penetration welding, the laser incident angle directly affects the shape of the keyhole, and also has a certain impact on the flow behavior of the molten pool. In this work, bead-on-plate penetration welding experiment combined with "half sandwich" experiment were conducted to study the effect of laser incident angles on weld mechanical properties and melt pool flow. The results show that in terms of the mechanical properties of the weld, the laser incident angle has less impact on the upper and middle parts of the weld, but has a greater impact on the bottom part. There are more pore defects in the tensile samples from the bottom of the weld. Moreover, compared with negative laser incident angle, the tensile strength and elongation of the weld are lower for positive laser incident angle. For positive laser incident angle, the keyhole morphology is of small top and big bottom, makes it easy to generate eddy currents at the bottom and form bubbles. In addition, the keyhole collapse frequency is greater than that at the negative laser incident angle, resulting in poor stability of the molten pool which leads to more pore defects.

**Highlights:** (1) The flow of molten pool and keyhole dynamics of laser deep penetration welding were directly observed by "half sandwich" method.

(2) The influence mechanisms of laser incidence angle on the mechanical property of laser deep penetration welds is revealed.

**Key words:** laser deep penetration welding; laser incident angle; melt pool flow; mechanical property

## 0 序言

自1960年美国物理学家Maiman发明激光器以来,激光材料加工技术在载运工具、航空航天、医疗器械以及核工业等领域得到广泛应用。激光焊接把高能量激光束辐照至金属材料表面,利用激光和金属材料之间的相互作用,金属材料吸收的光能转变成热能导致金属材料熔化后经过快速冷却结晶形成焊缝。其中激光焊接可以分为热传导焊与深熔焊,两者可以通过调整相关参数达到相互转换的效果。激光焊接熔池匙孔瞬态行为直接影响着熔池的流动行为,故可以通过试验直接观测匙孔的瞬态行为来表征熔池的流动行为。

目前在激光焊接领域,主要集中在研究不同工艺参数下激光焊接焊缝质量,针对深熔焊的研究多数是结合传导焊进行对比研究,而结合熔池流动行为对倾斜激光深熔焊的研究较少。在对熔池流动的调控策略中,多数是通过外加作用力的形式进行一系列的试验研究。针对激光工艺参数影响熔池的流动行为研究中,大多数学者是改变激光功率,也有学者采用脉冲激光调控策略,而倾斜焊接工艺多数是通过采用倾斜基板来实现<sup>[1-3]</sup>。Kumar等人<sup>[4]</sup>通过改变脉冲激光束入射角对奥氏体不锈钢进行激光焊接试验,研究表明不同的激光入射角会改变熔池的几何形状,形成不同的组织结构,获得不同拉伸强度和硬度的焊缝,激光功率是影响极限抗拉强度的最显著因素,其次是入射角和焊接速度。王鹏飞等人<sup>[5]</sup>通过采用倾斜基板激光熔覆试验方案,发现基体倾斜导致的重力作用方式的不同,会对熔池轮廓产生明显影响,从而影响熔池的流动行为。Chen等人<sup>[6]</sup>研究了激光入射角度对铝合金激光-电弧复合焊接中焊缝形貌和孔隙率的影响,通过对匙孔的

受力和熔池特性的分析,表明垂直向上倾斜焊接的性能优于垂直向下倾斜焊接。Mei等人<sup>[7]</sup>利用正交试验方案研究了激光束入射角对镀锌车身钢板搭接焊接性能的影响,结果表明存在一个临界倾斜角度以获得最佳焊接质量。使用数值模拟来研究倾斜激光深熔焊的熔池流动行为已成为主流,而试验法直接对激光束不同倾角下的激光深熔焊研究较少。高向东等<sup>[8]</sup>通过数值模拟方法重点研究了激光入射角对焊接熔池匙孔瞬态行为的影响,表明激光入射角会影响熔池流动行为,进而影响熔池形貌。随着计算机的快速发展,对激光焊接熔池流动的研究手段主要偏向于数值模拟<sup>[9-13]</sup>,但数值模拟的准确性仍需通过试验来进行验证。文中着重研究了激光深熔焊接中光束倾角对熔池流动行为及焊缝力学性能的影响,进而揭示不同激光入射角下熔池流动行为机制。

## 1 试验方法

试验设备采用IPG:YLS-4000-CL型光纤激光器,机器人为ABB公司的IRB2400/16型六轴机器人系统,激光焊接头为Precitec公司的YW50,夹具为自制夹具。光纤激光器最大输出功率为4000 W,功率输出不稳定性小于5%,工作模式为多模,连续输出,波长为1070~1080 nm。传输光纤芯径为400 μm,焊接头聚焦光斑直径为0.4 mm。六轴机器人重复定位精度为0.03~0.41 mm,并且可以通过指令实现焊接头角度的精确偏转。

激光深熔白板焊接试验选用厚度为10 mm的SUS 304奥氏体不锈钢,为防止材料表面的氧化层影响试验结果的准确性,试验前预先用砂纸打磨不锈钢表面,去除氧化层,最后酒精清洗其表面。SUS 304奥氏体不锈钢基材化学成分见表1。

表1 SUS 304 奥氏体不锈钢的化学成分(质量分数, %)  
Table 1 Chemical composition of SUS 304 austenitic stainless steel

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Fe
≤0.08	≤2.0	—	18.2	8.00	≤0.045	≤0.03	余量

采取不同激光倾斜方式进行SUS 304奥氏体不锈钢白板焊接试验,其中激光功率为4000 W,焊接速度为10 mm/s,激光的离焦量为0 mm,即激光束的焦点位于焊接工件表面。定义激光束向焊接反方向倾斜为负激光入射角方向,向焊接前进方向倾

斜为正激光入射角方向,图1(a)为激光深熔焊接试验示意图。取激光入射角I为-25°、-20°、-10°、0°、+10°、+20°、+25°进行相互对照试验。为保证控制激光入射角单一变量,试验采取0离焦状态,即在激光器倾斜的同时调整激光头高度以保证激光

焦点始终处于材料表面,进而完成不同激光入射方式深熔焊接试验,并在侧向布置高速相机实时拍摄熔池流动过程。利用电火花线切割将焊缝进行分区切割处理,如图 1(b)所示,取上、中、下三个位置的焊缝进行分析。根据 ASTM E8 标准将截取的焊缝制作标准拉伸件,如图 1(c)所示,对 7 个角度下 21 个标准试件进行室温静态拉伸试验,分析焊缝的力学性能。利用 SEM 观测拉伸件断口,分析断口形貌。采用“半三明治”焊接工艺进行匙孔观测试验<sup>[14]</sup>,利用高速相机实时拍摄焊接匙孔动态和熔池流动行为,分析不同激光入射方式对匙孔形貌和气孔缺陷的影响。

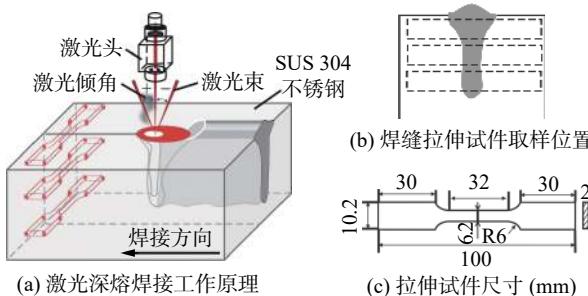


图 1 激光焊接试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser welding experiment.  
(a) experiment setup for laser deep penetration welding; (b) schematic illustration of samples preparation for tensile testing; (c) geometric sketch of tensile specimen

## 2 试验结果与分析

### 2.1 焊缝力学性能分析

根据上、中、下三个位置的焊缝拉伸试验结果:(1)上部位置的焊缝强度明显高于基材部分,拉伸试件均断裂在基材部分。其抗拉强度最大值为 778.3 MPa,平均值达到 765.6 MPa,因此激光深熔焊接可以适当提高材料的抗拉强度。(2)中间位置焊缝强度有所降低,出现部分试件断裂于焊缝处。初步观察断口形貌,断裂于焊缝处的试件均存在气孔或裂纹等缺陷。(3)下部位置焊缝强度进一步降低,试件几乎都断裂于焊缝处,故对下部位置的焊缝进一步讨论分析。

不同激光入射角焊接工艺条件下焊缝下部位置拉伸试件应力—应变( $\sigma$ - $\epsilon$ )曲线如图 2(a)所示,进一步计算出拉伸试件的抗拉强度  $R_m$  和断后伸长率  $A$  如图 2(b)所示。下部位置焊缝的平均抗拉强度为 688.6 MPa,仅为基材抗拉强度的 89.9 %,并

且下部位置的焊缝抗拉强度及断后伸长率均出现负激光入射角高于正激光入射角规律。

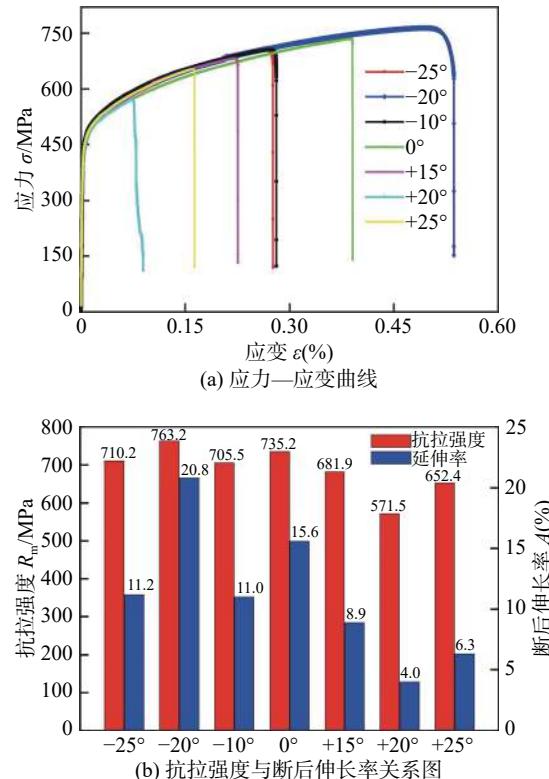


图 2 不同激光入射角下的下部焊缝试件拉伸性能

Fig. 2 Tensile properties of lower part weld specimens at different laser incidence angles. (a) stress-strain curves; (b) relationship of tensile strength and elongation

### 2.2 焊缝断口形貌分析

鉴于焊缝的下部位置力学性能具有代表性,需进一步研究分析。首先通过光学显微镜拍摄正负激光入射角工艺下下部位置焊缝断口形貌,再利用 Photoshop 软件测量出缺陷的面积值  $S$ ,绘制折线图(图 3)。由图可知,负激光入射角下的焊缝断口缺陷面积小于正激光入射角,结合上述对焊缝拉伸

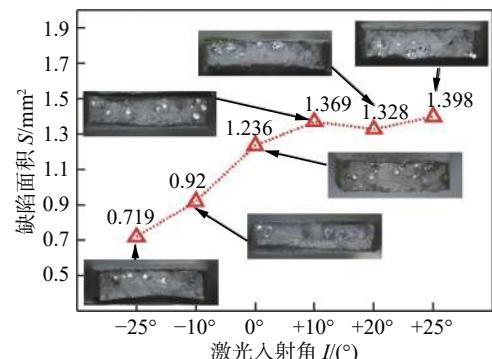


图 3 不同激光入射角拉伸断口缺陷面积关系图

Fig. 3 Area diagram of tensile fracture defects at different laser incidence angles

性能分析,表明缺陷的存在是使焊缝抗拉强度大幅降低的主要原因,同时采用负激光入射角焊接方式能够获得更高力学性能的焊接件。

为研究激光深熔焊熔池流动行为,可通过追踪气孔来对熔池流动行为进行定性分析,揭示激光倾斜方式对熔池流动的影响。奥氏体不锈钢焊缝中一般存在两种类型的气孔,分别为氢气孔和匙孔效应引起的气孔。其中氢气孔大部分出现在焊缝中上部分,这是由于焊接过程中产生的氢气随着熔池流动往上运动时,熔池的快速冷却凝固特性使之来不及逸出,导致该类气孔主要集中在焊缝中上部;匙孔型气孔则是由于激光深熔焊,匙孔深度较大,金属蒸汽在匙孔中剧烈蒸发,匙孔处于不稳定状态,随着熔池的流动,熔池底部的金属蒸汽封闭在匙孔内,从而形成一系列不规则的气孔。激光深熔焊由于深径比较大,根据尖端效应,熔池底部易产生并残留大量的气孔。如图4所示,图4(a)为激光入射角为 $+20^\circ$ 时焊缝中部位置的拉伸件断口形貌,图4(b)为激光入射角为 $+20^\circ$ 时焊缝下部位置的拉伸件断口形貌,图中可以明显看出中间位置的气孔属于氢气孔,气孔壁较为光滑,气孔形状近乎球形。下部位置的气孔属于匙孔效应引起的气孔,气孔壁较为粗糙,内壁表现为层状或条纹状痕迹,这是底部熔池在凝固时金属流动形成的涡流痕迹,并且中心伴有凝固金属形成的“小岛”,形状也不规则。对比分析气孔边缘断裂模式,匙孔型气孔存在以气孔边缘为起裂点的解理台阶平面,并呈现出河流纹状花样,这也说明匙孔型气孔的存在使得焊缝出现局部脆性断裂<sup>[15]</sup>。而氢气孔边缘依然呈现出以韧窝为主的韧性断裂模式。也就是说,匙孔型气孔的存在

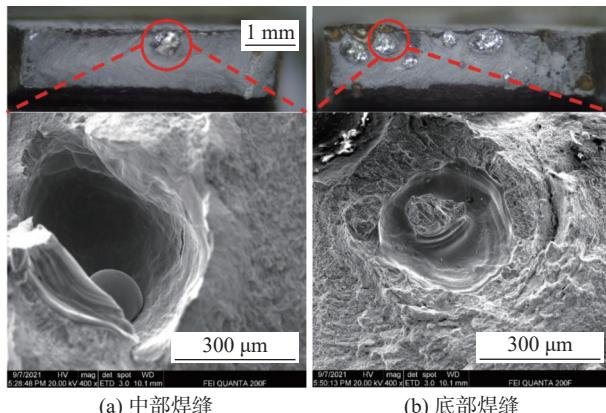


图4  $+20^\circ$ 激光倾角时焊缝拉伸断口形貌

Fig. 4 Tensile fracture of weld specimens at  $+20^\circ$  laser beam. (a) middle section; (b) bottom section

会使材料的断裂模式从韧性断裂向脆性断裂转变,而氢气孔的存在几乎不改变其断裂模式。

### 2.3 激光入射角对匙孔与熔池流动行为的影响

为进一步确定焊接熔池的流动形式,在进行激光深熔焊接试验的同时利用侧轴高速相机记录熔池表面的流动过程。分别选取了激光入射角为 $+20^\circ$ 和 $-20^\circ$ 的焊接过程片段进行分析,间隔时间为2 ms,如图5所示。图中可看出,在激光深熔焊接中,由于高激光能量密度下材料蒸发产生反冲压力促使熔池在匙孔后壁处向上流动,形成熔滴后在重力的作用下向下流动,熔池表面由于受到表面张力的作用使得熔池向外流动。由于倾斜方式的不同,熔池流动的形式也有所不同,当激光倾角为正时(图5(a)),形成的熔滴在匙孔后壁倾斜冒出,其倾斜角度与激光倾斜角度一致,而后随匙孔前壁流下;当激光倾角为负时(图5(b)),形成的熔滴在匙孔后壁近乎垂直平面冒出,而后随匙孔前壁流下。在水平方向上熔池表面都是向焊接反方向流动。从熔池流动稳定性角度也能看出负激光入射角下的熔池较正激光入射角下的熔池稳定。高速相机侧轴拍摄只能观测出熔池表面的流动形式,无法记录匙孔内部熔池流动行为。

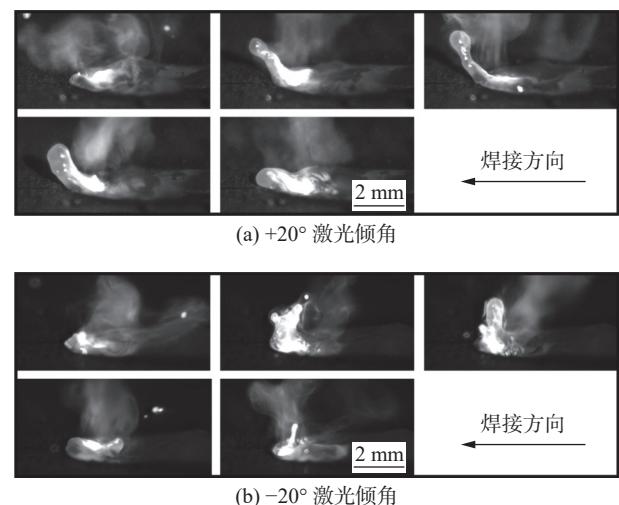


图5 高速相机拍摄不同倾角下熔池流动  
Fig. 5 High-speed camera captures the flow of molten pools at different inclination angles. (a)  $+20^\circ$ ; (b)  $-20^\circ$

为了进一步分析不同倾斜方式下匙孔内部熔池流动,揭示焊缝成形及内部气孔缺陷形成机制,采用“半三明治”方法(由一块不锈钢材料和一块GG17玻璃组成),通过高速相机实时拍摄匙孔内部过程,直接观察深熔焊过程中匙孔内熔融金属流动特征。并进一步对比分析不同倾斜方式熔池流动特

征变化规律.

根据追踪气泡的移动可定性反映熔池的流动方向, 激光入射角为 $+20^\circ$ 的激光焊接“半三明治”试验如图 6 所示, 在  $t$  时刻匙孔前壁捕获到一个气泡, 经过 171 ms 以及 355 ms 后, 气泡逐渐移动到了熔池底部并最终残留于此. 可推断出熔池流动方向为沿着匙孔前壁向下及向后方流动.

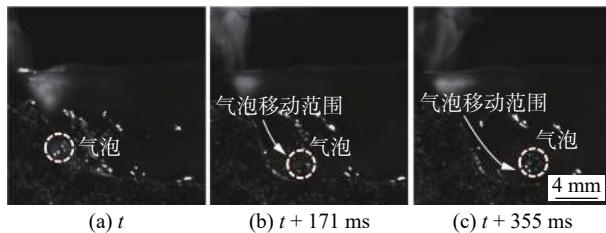


图 6  $+20^\circ$ 激光倾角时气泡在熔池中的流动

Fig. 6 The flow of bubbles in the molten pool at  $+20^\circ$  laser beam. (a)  $t$ ; (b)  $t + 171$  ms; (c)  $t + 355$  ms

图 7 为 $-20^\circ$ 下直接观测熔池流动“半三明治”焊接试验, 利用匙孔中亮点的移动状况辅助观察其流动, 图像间隔时间为 0.148 ms, 可以观察到熔融金属是沿着匙孔壁流动, 具体为熔融金属沿匙孔前壁向下流动, 然后沿匙孔后壁向上流动.

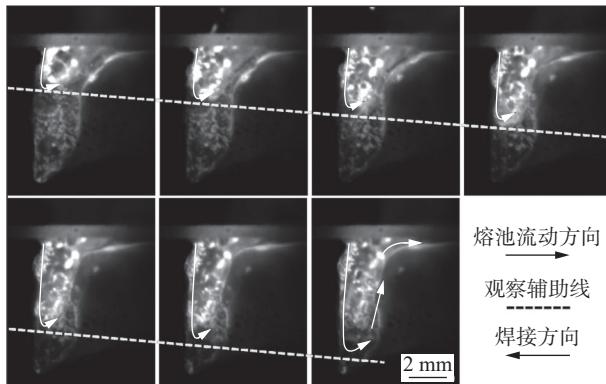


图 7 高速相机拍摄 $-20^\circ$ 激光倾角时熔池流动

Fig. 7 High-speed camera captures the flow of the molten pool at  $-20^\circ$  laser beam

图 8 所示为正、负激光倾斜方式下匙孔的形貌图, 从图中可看出, 正激光入射角下匙孔形貌为“上小下大”(图 8(a)), 这也将导致熔池底部易产生涡流, 不利于气泡的排出; 而负激光入射角下匙孔形貌为“上大下小”, 见图 8(b), 熔池内部产生涡流的可能性降低, 底部产生的气泡也易随熔池的流动正常排出. 因此, 激光入射方式影响匙孔的形貌, 导致不同的熔池流动形式, 使得气孔缺陷的产生有所不同, 最终影响焊缝试件的力学性能.

## 2.4 激光入射角对熔池稳定性及焊缝缺陷的影响

匙孔的动态行为会直接影响熔池的稳定性, 通

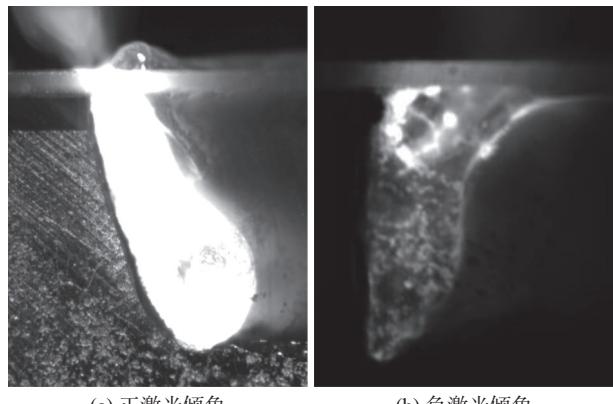


图 8 不同激光入射角下的匙孔形貌图

Fig. 8 Topography of the keyhole. (a) positive laser incident angle; (b) negative laser incident angle

过对上述“半三明治”试验进行图像数据分析, 可进一步研究不同激光入射角对匙孔稳定性的影响. 试验利用高速相机采集“半三明治”焊接过程中匙孔的动态图像, 并运用 Matlab 软件对采集到的图像进行处理, 分析不同激光入射角下匙孔的变化情况, 进而推断出激光入射角对熔池稳定性的影响.

通过对上述数字图像处理后的图像进行指定区域面积的提取, 通过单位换算将像素面积换算成匙孔实际开口面积. 试验采集了焊接过程稳定后的连续 2000 张匙孔动态形貌图进行数据分析, 即匙孔在 296 ms 间隔的变化情况. 分别对激光入射角为 $+10^\circ$ 和 $-10^\circ$ 下匙孔开孔面积进行对比分析, 从匙孔的开口面积变化情况来分析匙孔的稳定性, 进而推断出激光入射角对熔池流动行为的影响.

图 9 为激光入射角为 $+10^\circ$ 工艺下的激光深熔焊接匙孔的开口面积的变化规律曲线图. 在激光深熔焊接中, 当匙孔开孔面积出现大幅度减小且持续较长时间的情况, 即可以推断出该状况为匙孔坍塌阶段. 从图中可以看到, 在入射角为 $+10^\circ$ 的焊接过程中, 焊接匙孔开孔处面积一直处于剧烈变化的状态, 且出现周期性的匙孔坍塌与复原, 其中匙孔坍塌的现象在 296 ms 内出现了 4~5 次.

图 10 为激光入射角为 $-10^\circ$ 工艺下的激光深熔焊接匙孔的开孔面积的变化规律. 从图中可以看到, 焊接匙孔开孔面积变化较为平缓, 钥匙孔开孔面积出现持续降低的次数少, 即匙孔坍塌的现象在 296 ms 内仅出现了 2 次. 可见正激光入射角下匙孔坍塌的频率较负激光入射角下匙孔坍塌的频率高.

匙孔效应引起的气孔缺陷主要源于匙孔的坍塌, 该类型气孔主要集中在匙孔下方, 即熔池的底

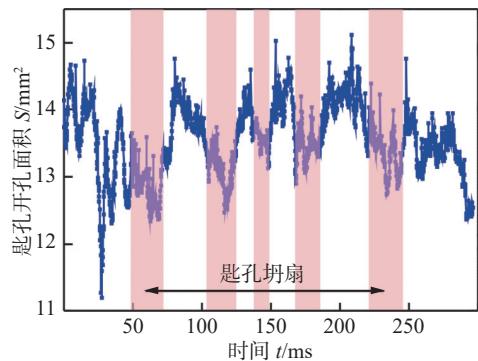


图9 +10°激光入射角下匙孔开口面积变化

Fig. 9 Variation of keyhole opening area at +10° laser incidence angle

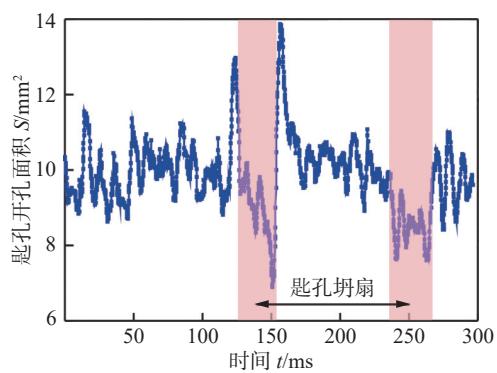


图10 -10°激光入射角下匙孔开口面积变化

Fig. 10 Variation of keyhole opening area at -10° laser incidence angle

部,由于熔融金属的回填导致该气孔逸出难度较大,因此在焊缝底部会残留大量的气孔。根据上述对匙孔开口面积的统计,当激光入射角为-10°时,匙孔较为稳定,匙孔坍塌的频率较低,因此产生匙孔型气孔数量较少;当激光入射角为+10°时,匙孔变化较为剧烈,匙孔坍塌的频率较高,因此产生匙孔型气孔数量较高。结合上述对焊接接头的断口形貌分析,同样证实了在焊缝的下部位置气孔分布情况,其中正激光入射角工艺下的焊缝下方气孔缺陷面积大于负激光入射角工艺下的焊缝。正激光入射角焊接工艺下匙孔的坍塌频率较高,可能是因为激光束的倾斜,导致匙孔后方的熔池在未凝固之际由于重力的作用会往下掉落,从而破坏了匙孔的稳定性。总的来说,在激光深熔焊接中,不同激光入射角对匙孔的动态行为有不同的影响,负激光入射角焊接工艺可降低匙孔坍塌的频率,使得熔池流动更为平稳。

通过以上一系列的观测试验,总结分析出了激光深熔焊接匙孔/熔池的具体演化方式。不同倾斜方式下激光深熔焊熔池流动示意图如图11所示,

其中红色箭头表示熔池的流动方向。当激光入射角为正时(图11(a)),一部分激光束经过匙孔前壁反射到匙孔后壁,匙孔后壁吸收了能量导致部分即将凝固的金属蒸发,形成“上小下大”的匙孔形貌,导致匙孔下部熔池发生剧烈变化,使得金属熔池更容易在匙孔下部形成涡流。由于匙孔的尖端效应,产生于匙孔下部的气孔很难随着熔池的流动排出熔池外,导致下部残留大量的氢气孔,并且“上小下大”的匙孔形态使得匙孔处于极不稳定状态,容易导致匙孔后壁坍塌,使得在熔池底部也残留大量匙孔型气孔。因此,在正激光入射角下,熔池流动较为剧烈,该过程形成的焊缝在下部存在两种气孔,即氢气孔和匙孔效应引起的气孔。当激光入射角为负时(图11(b)),激光束照射到匙孔底部,匙孔后壁相对稳定,使得熔池流动较为稳定,不易产生气孔,并且形成的气孔也很容易随着熔池的流动排出熔池外,使得焊缝下部气孔数量较少。因此,采用负激光入射角有利于减少气孔的形成,提高焊缝的力学性能,获得较高质量的焊接构件。

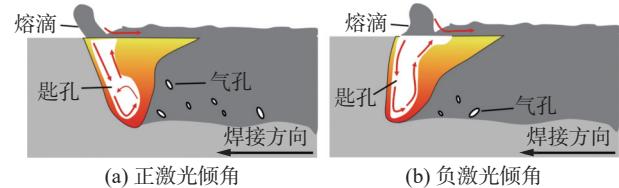


图11 激光深熔焊熔池流动示意图  
Fig. 11 Flow diagram of laser deep penetration welding molten pool. (a) positive laser incidence angle;  
(b) negative laser incidence angle

### 3 结论

(1) 在焊缝的力学性能上,正、负光束倾角对焊缝上部的影响差异性较小;对焊缝中部的影响次之,个别焊接试件出现气孔,导致焊缝的抗拉强度和延展性有所下降;对焊缝下部的影响最大,负激光入射角下的焊缝力学性能优于正激光入射角。

(2) 在激光深熔焊接奥氏体不锈钢时,形成的焊缝一般存在氢气孔和匙孔型气孔两类气孔,其中氢气孔主要存在于焊缝的上中部,匙孔型气孔主要存在于焊缝的下部。

(3) 正、负光束倾角下熔池流动行为差异较大,正激光入射角“上小下大”的匙孔形貌使其底部易产生涡流,不利于气泡的排出,负激光入射角“上大下小”的匙孔形貌导致熔池内部不易形成涡流,底

部产生的气泡易随着熔池的流动而逸出。

(4) 光束倾角对熔池稳定性及焊缝缺陷的影响较大, 正激光入射角匙孔坍塌的频率高于负激光入射角, 进而导致更多的气孔缺陷形成。

## 参考文献

- [1] 李海波, 李涛, 王鑫林, 等. 倾斜基体对激光熔覆能量分布的影响研究 [J]. 应用激光, 2017, 37(3): 333-339.  
Li Haibo, Li Tao, Wang Xinlin, et al. Study on the influence of the inclined substrate to the energy distribution of laser cladding [J]. Applied Laser, 2017, 37(3): 333-339.
- [2] Yang J, Aiyiti W, Jiang H, et al. Evolution of molten pool morphology and prediction of inclined cladding layer morphology[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 142: 107164.
- [3] Li X, Li T, Shi B, et al. The influence of substrate tilt angle on the morphology of laser cladding layer[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 391: 125706.
- [4] Kumar N, Mukherjee M, Bandyopadhyay A. Study on laser welding of austenitic stainless steel by varying incident angle of pulsed laser beam[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 94: 296 – 309.
- [5] 王鹏飞, 杨坤, 陈明智, 等. 倾斜基板激光熔覆 GH3536 熔池形貌的仿真与实验研究 [J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002121.  
Wang Pengfei, Yang Kun, Chen Mingzhi, et al. Simulation and experimental research on the GH3536 molten pool laser cladded on inclined substrate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002121.
- [6] Chen C, Shen Y, Gao M, et al. Influence of welding angle on the weld morphology and porosity in laser-arc hybrid welding of AA2219 aluminum alloy[J]. Welding in the World, 2019, 64(1): 37 – 45.
- [7] Mei L, Yan D, Chen G, et al. Influence of laser beam incidence angle on laser lap welding quality of galvanized steels[J]. Optics Communications, 2017, 402: 147 – 158.
- [8] 高向东, 冯燕柱, 桂晓燕, 等. 激光入射角影响焊接熔池匙孔瞬态行为数值模拟 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 82 – 89.  
Gao Xiangdong, Feng Yanzhu, Gui Xiaoyan, et al. Numerical simulation of effects of laser incident angle on transient behaviors of molten pool and keyhole during laser welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(22): 82 – 89.
- [9] Sohail M, Han S-W, Na S-J, et al. Characteristics of weld pool behavior in laser welding with various power inputs[J]. Welding in the World, 2014, 58(3): 269 – 277.
- [10] Lu F, Li X, Li Z, et al. Formation and influence mechanism of keyhole-induced porosity in deep-penetration laser welding based on 3D transient modeling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 90: 1143 – 1152.
- [11] Li X, Lu F, Cui H, et al. Numerical modeling on the formation process of keyhole-induced porosity for laser welding steel with T-joint[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(1-4): 241 – 254.
- [12] Zhang D, Zhang P, Liu Z, et al. Thermofluid field of molten pool and its effects during selective laser melting (SLM) of Inconel 718 alloy[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 567 – 578.
- [13] 李俐群, 郝雨, 彭进. 表面张力对激光深熔焊熔池流动的影响 [J]. 焊接学报, 2019, 40(2): 13 – 19,161.  
Li Liqun, Hao Yu, Peng Jin. Effect of surface tension on molten pool flow in laser deep penetration welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(2): 13 – 19,161.
- [14] 付艳恕, 卢聪, 叶小军, 等. 激光材料加工熔池流动行为实验研究进展 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(5): 291 – 306.  
Fu Yanshu, Lu Cong, YE Xiaojun, et al. Review of experimental study on melt pool flow dynamics during laser material processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(5): 291 – 306.
- [15] Chen J H, Cao R. 金属解理断裂微观机理 [M]. 曹睿译. 北京: 科学出版社, 2018.  
Chen Jianhong, Cao Rui. Micromechanism of cleavage fracture of metals[M]. Cao Rui, Transl. Beijing: Science Press, 2018.

**第一作者:** 肖先锋, 博士, 讲师; 主要研究方向为激光焊接和激光增材制造; Email: [xxf@ncu.edu.cn](mailto:xxf@ncu.edu.cn)

**通信作者:** 付艳恕, 博士, 教授, 硕士研究生导师; 主要研究方向为特种加工技术; Email: [yshfu@ncu.edu.cn](mailto:yshfu@ncu.edu.cn)

(编辑: 张宏强)