

高功率光纤激光焊接底部驼峰的机理研究

陈根余^{1,2} 夏海龙² 周 聪^{1,2} 李时春² 黎长邹²

¹湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082

²湖南大学激光研究所, 湖南 长沙 410082

摘要 高功率光纤激光焊接 SUS 304 不锈钢板的过程中, 熔池由于受力不平衡出现下掉, 并在试件底部流动堆积, 从而形成底部驼峰。采用高速摄像和“三明治”试件焊接新方法, 分别从不同角度拍摄熔融金属的流动情况并从侧面直接观测小孔和熔池的变化过程。结果表明, 孔内熔融金属流动的不连续和小孔前沿孔壁凸起向下移动, 以及孔内金属蒸气压力导致小孔底部熔池形成多个熔滴; 底部熔池表面张力和熔池的流动导致熔融金属不断向后流动从而汇聚形成驼峰; 底部驼峰的形成影响熔池的流动状态, 是导致焊缝表面塌陷的原因。

关键词 激光光学; 激光技术; 激光焊接; 底部驼峰; 熔池流动; 高速摄像

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0203004

Study on the Mechanism of Root Humping of Laser Welding with High Power Fiber Laser

Chen Genyu^{1,2} Xia Hailong² Zhou Cong^{1,2} Li Shichun² Li Changzou²

¹State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

²Laser Research Institute, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

Abstract In the process of high power fiber laser welding of SUS 304 stainless steel plate, the dynamic pool endures imbalanced force and is very unstable. The pool is prone to dropping down. The pool is dropping down, which makes a flow accumulation at the bottom of the specimen, and a root humping forms. By using high-speed camera and “sandwich” new welding method, the pictures of the flow of the molten metal from different angles are taken and the longitudinal keyhole and the dynamic pool are observed. The results show that the molten metal flow is not continuous in the keyhole, the moving downward shelf on the front of the keyhole wall and the pressure of metallic vapor inside the keyhole lead to a plurality of droplet in the bottom of the pool. The surface tension and the flow of melt pool cause the backward flow of the molten metal. With the accumulation of molten metal, the root humping is formed. The root humping influences the flow state of melt pool, which results in the undercut on the weld surface.

Key words laser optics; laser technique; laser welding; root humping; melt flow; high speed imaging

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 350.3390

1 引 言

近年来,随着高功率、高光束质量光纤激光器的出现和发展,激光深熔焊接技术在航空航天、船舶、核电等大型工程的中厚板焊接制造领域有了更进一步的研究和应用^[1-3]。焊接中厚板过程中,光纤激光功率密度可达 $10^6\sim 10^8\text{ W/cm}^2$,导致小孔及其内外等离子体、熔池的形成及其稳定维持力的平衡等方面比焊接薄板时要更加复杂,容易形成飞溅、表面塌陷及底部驼峰等各种焊接缺陷^[4],从而影响焊缝的外观形貌,甚至改变焊

收稿日期: 2014-08-04; 收到修改稿日期: 2014-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(51175165)、国家科技重大专项(2013ZX04001131)

作者简介: 陈根余(1965—),男,博士,教授,主要从事激光焊接等方面的研究。E-mail: hdgychen@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

缝的力学性能^[5]。

近年来,裴莹蕾等^[6-9]就光纤激光驼峰焊道形成机理进行了研究,指出液态金属向熔池尾部高速流动汇聚,波谷处率先冷却凝固,阻止熔池尾部熔融金属回流,这是形成驼峰的原因。但研究仅仅集中在薄板上表面驼峰,而薄板激光焊接过程中并不会出现底部驼峰焊道现象。Eriksson等^[10-11]借助高速相机对中厚板底部驼峰形成进行观测研究,指出底部驼峰的形成与薄板上表面高速驼峰焊道存在本质的区别。为了能够实现高质高效的激光焊接中厚板,深入研究分析底部驼峰的产生机理非常有必要。

本文使用高速相机从不同角度直接拍摄高功率激光焊接厚度为5 mm的SUS 304不锈钢板底部驼峰产生时小孔开口和熔池动态流动过程,并采用改进的“三明治”试件进行焊接试验^[12-13],同时采用高速相机从侧面直接观察小孔及熔池的动态情况。研究了高功率光纤激光焊接底部驼峰焊道形成时,上表面熔池的流动、小孔开口的动态变化以及焊接不同阶段底部熔池的流动变化过程,同时分析了孔内金属蒸气压力的变化以及底部驼峰产生的因素。

2 试验材料和设备

试验采用厚度为5 mm的SUS 304不锈钢钢板,其GB牌号为0Cr18Ni9。改进的“三明治”试验材料尺寸为40 mm×5 mm×5 mm,采用高速相机拍摄试验材料尺寸为100 mm×60 mm×5 mm,其材料化学成分如表1所示。焊接过程中均采用Ar保护,保护气流量固定为20 L/min。

表1 304不锈钢材料的化学成分及含量(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the 304 stainless steel (mass fraction, %)

Composition	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	N	S	Fe
Content	0.07	18.28	8.15	2.00	0.075	0.045	0.1	0.03	Bal.

试验设备采用YLR-4000-C-WA光纤激光器,其中激光波长为1.07 μm,最大输出功率为4.0 kW,连续输出,输出模式为TEM₀₀。激光通过芯径为400 μm的操作光纤传递,经过焦距为150 mm的准直镜和200 mm的聚焦镜后得到的焦光斑直径为0.533 mm。高速相机为Photron Fastcam SA4,辅助光源为半导体激光器。焊接试验前使用丙酮严格清洗去除试件表面油污。试验中使用辅助光源照射焊缝熔池,同时采用高速摄像的方法,直接观测底部驼峰产生时的小孔及熔池动态过程,试验装置示意图如图1所示。为较全面观测不同位置熔池的流动状态,改变高速相机拍摄的角度和位置。图2为改进的“三明治”试验焊接示意图,将一块不锈钢试件和一块GG17玻璃夹紧,制成金属与玻璃对接形式的焊接试件,激光沿着不锈钢试件与玻璃的对接处进行焊接,形成焊接小孔以及熔池^[14]。试验过程中,采用滤光片滤除等离子体,高速相机透过滤光片和GG17玻璃从侧面直接拍摄小孔及其附近熔池的流动情况。

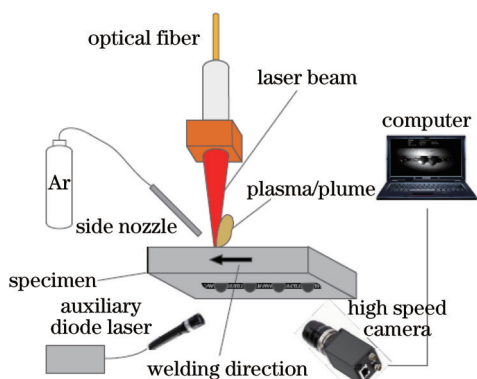


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental setup

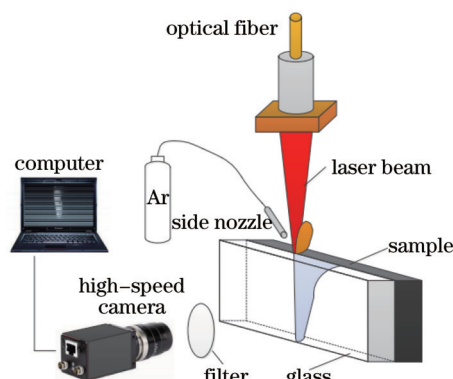


图2 改进的“三明治”试件焊接示意图

Fig.2 Schematic of welding with modified sandwich sample

3 试验结果与分析

3.1 小孔及熔池动态过程

在高速相机拍摄过程中,选取系列图片来分析焊接过程的动态变化。每一张图对应一个时间点。采用

改进的“三明治”新方法拍摄的底部驼峰产生时小孔和底部熔池的动态过程如图3所示,其高速相机的拍摄频率为5000 fps,高速相机在拍摄过程中,选取了系列图片来分析焊接过程的动态变化,每一张图片对应一个时间点, t_0 为图3(a)所对应的图片,是高速相机拍摄此图片的时间点。由图可以看出熔池的高亮区域距离试件上表面有一定距离,熔池在试件底部流动,可知整个焊接熔池下移,焊缝上表面熔融金属不足而出现塌陷。如图3(a)~(c)所示,小孔内金属蒸气压力不断加大使得小孔逐渐穿透工件,且小孔底部及其周围的熔融金属都增加,同时,试验中观测到小孔前壁液体凸起^[15-16]的存在,激光辐照在凸起上导致其熔融金属局部剧烈蒸发,蒸发反冲压力推动液体凸起下部熔融金属向下高速移动,Eriksson等^[17]采用高速摄像技术测得小孔前沿孔壁液体凸起向下流动速度为7 m/s。在孔内金属蒸气压力增大与液体凸起向下动量的共同作用下,熔融金属向下伸出试件的内部熔池。在此过程中,部分金属蒸气甚至从试件底部喷出,如图3(b)所示。金属蒸气喷出后导致小孔内压力减小,小孔底端区域在熔池表面张力的作用下又回到熔池内部,如图3(c)~(d)所示,但底部熔池并没有随着小孔回到熔池内部,这是由于底部熔池表面张力不足以克服自身重力以及小孔前沿熔融金属向下的动量。之后,小孔底部熔池向后流入驼峰内,如图3(e)所示。由上述分析可知孔内金属蒸气压力以及前沿孔壁液体凸起的向下动量是熔融金属被推出试件底部的重要原因。

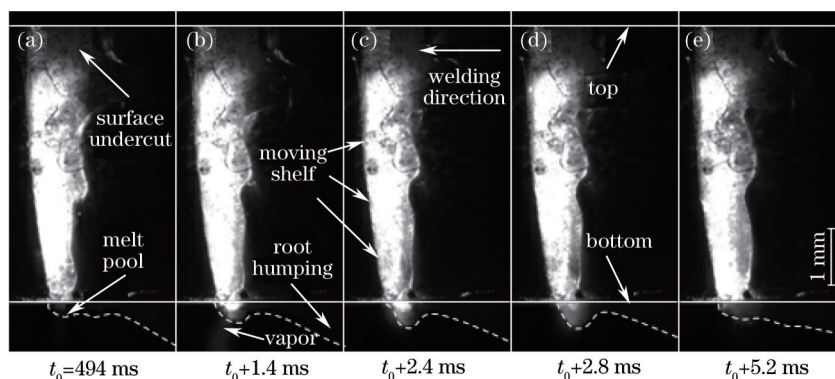


图3 底部驼峰产生时小孔和底部熔池的动态过程

Fig.3 Dynamic process of the keyhole and the bottom melt pool for root humping formation stage

3.2 底部熔池的流动情况

3.2.1 第一个底部驼峰形成过程

焊接起始阶段,仅熔池为熔透状态,第一个底部驼峰形成时试件底部熔池的流动情况如图4所示,其高速相机的拍摄频率为10000 fps。由于焊接过程刚刚开始,整个焊缝熔池较小,焊缝熔池的表面张力无法克服高速向下运动的熔融金属的动量而形成底部飞溅,如图4(a)所示。随着焊接的进行,在试件底部形成液柱,实验中观测到金属液柱体积增大,变长变粗,并向焊接反方向倾斜角度变大,这是由于熔融金属存在着向焊接反方向的速度分量,在此方向上的能量堆积使得金属液柱向焊接反方向倾斜角度变大,如图4(b)~(d)所示。当焊接进行一段时间后,由于过多的金属液体汇聚,在自身重力以及小孔前沿液体台阶下部熔融金属的向下动量的作用下,液柱尾端克服熔池的表面张力的作用而形成大颗粒珠状液滴飞溅,如图4(e)所示。由于珠状液滴飞溅使得能量丢失,整个液柱竖直向下的动量减小,在表面张力作用下金属液柱被拉回,驼峰雏形形成,如图4(f)~(g)所示。另外实验观测到,驼峰前沿熔融金属向驼峰内流动汇聚明显大于驼峰后沿熔融金属的流出,使得底部驼峰熔池不断地变大,如图4(h)所示。这是由于一方面金属液体在流动过程中一直收到表面张力作用,熔融金属流动速度降低;另一方面,由于底部驼峰前沿温度相对后沿较高,使得后沿B处表面张力比前沿A处大,A处金属液体更容易流动,B处流动缓慢,从而使得底部驼峰体积不断地变大,如图5所示。

因此,表面张力作用是导致底部驼峰产生的重要原因;底部驼峰前后沿温度差异,是导致驼峰体积变大的原因。

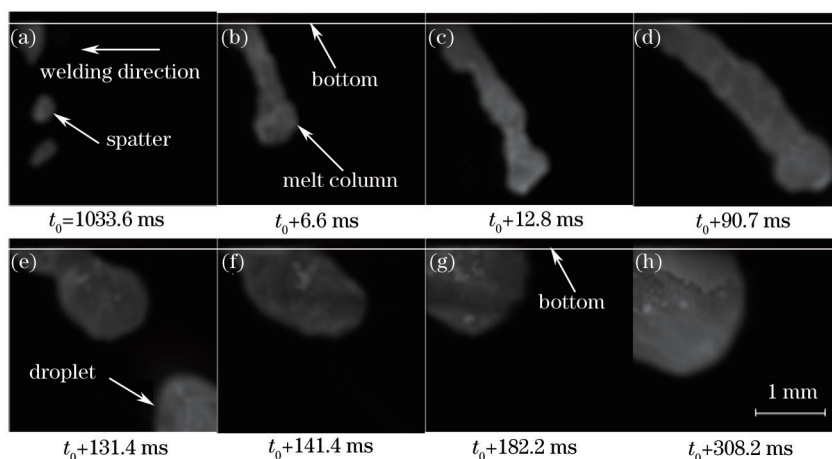


图4 焊接起始阶段底部驼峰形成时底部熔池的流动情况

Fig.4 Flow of the melt pool on the bottom surface for root humping formation stage at the beginning of welding

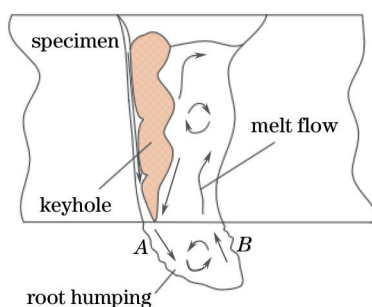


图5 底部熔池流动示意图

Fig.5 Schematic of melt flow in the bottom pool

3.2.1 焊缝中段驼峰的形成

底部驼峰形成过程中小孔底部熔池的流动情况如图6所示,其高速相机的拍摄频率为5000 fps。图中驼峰A正处于凝固状态,驼峰B正在形成长大,黑色箭头为小孔前沿被推出的熔滴在小孔底部熔池的流动情况。小孔前沿底部熔池如图6(a)所示。随着焊接的进行,小孔前沿熔融金属被推出内部熔池,如图6(b)所示。之后,被推出的熔滴在焊缝底部熔池边缘流动,如图6(c)~(e)所示。最后,熔滴被拉回焊道熔池,不断向后流动汇聚,导致驼峰熔池不断长大,如图6(f)所示。整个过程中并未见到图4(a)所示的飞溅和图4(e)所示的大颗粒珠状液滴。

纵观图6(a)~(f),熔滴从小孔前沿形成到被拉回小孔后部焊道熔池整个过程,熔滴始终向熔池尾部运动,这在一定程度上加速了焊缝底部驼峰的形成,是底部驼峰形成的重要因素。

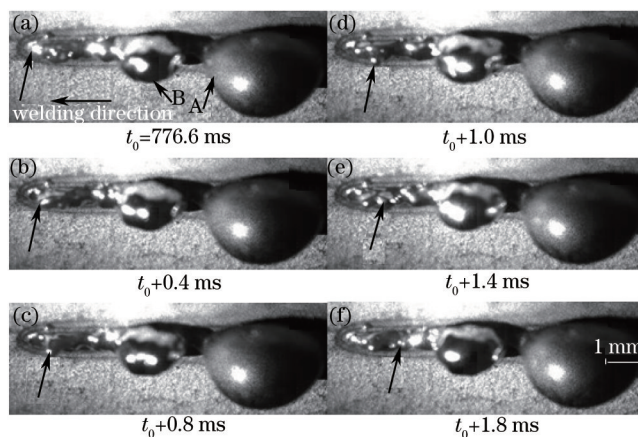


图6 底部驼峰形成过程中小孔底部熔池的流动情况

Fig.6 Flow of the melt pool at the bottom of the keyhole for root humping formation stage

底部驼峰形成过程小孔前沿和侧壁的底部熔池流动情况如图7所示,其高速相机的拍摄频率为10000 fps。图7是在图6的基础上改变拍摄角度以及调整拍摄距离所得,图中白色线条表示焊缝内部熔池被推出后在试件底部的流动轮廓。刚刚被推出内部熔池的金属液体如图7(b)所示,其白色线基本与试件底部平行。随着焊接进行,前端熔池金属液体不断向下运动,后端的金属液体几乎没有向下运动,由图7(b)~(e)中白色线条斜率改变可知底部熔池不同位置熔融金属运动速率不等,这可能是由于小孔孔壁不同位置金属液体蒸发量不一样,导致反冲压力不等,从而速率不等。随着焊接的继续进行,又有新的液体轮廓2形成,如图7(f)所示。前一次形成的液体轮廓1开始向焊接速度反方向移动,如图7(f)~(h)所示。由图7还可以看到驼峰前面熔池体积逐渐减小,且驼峰前沿由金属液体向内流动引起的波纹。底部驼峰的形成影响熔融金属在试件背部的流动。

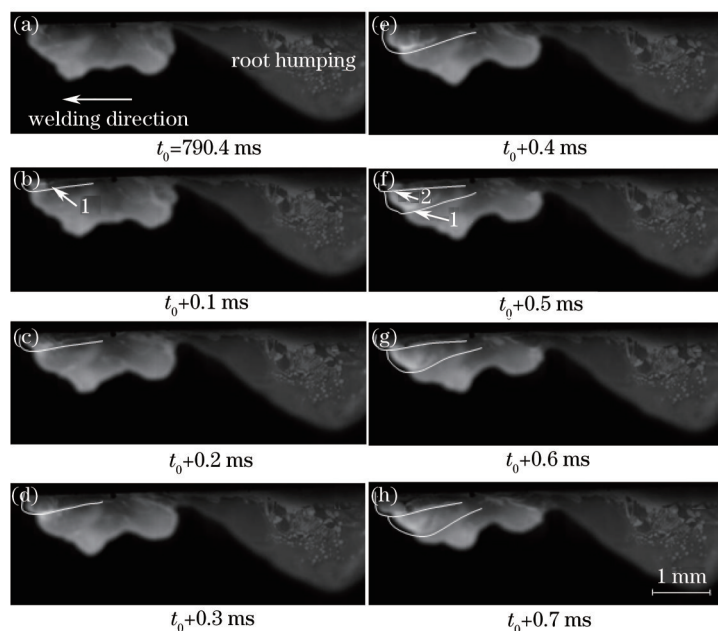


图7 底部驼峰形成过程小孔前沿和侧壁的底部熔池流动情况

Fig.7 Flow of the melt pool at the bottom of the front and side keyhole wall for root humping formation stage

由底部熔池的流动轮廓可以合理推断出小孔内熔融金属的流动像波纹一样并非连续流动,这也印证了小孔内部孔壁充满褶皱。

在图3、图6及图7中,小孔底部存在多个熔融金属流动轮廓和熔滴,小孔前壁存在多个液体凸起,小孔侧壁充满褶皱;另外,孔内熔融金属被推出试件后始终向熔池尾部流动;同时,基于大量“三明治”试验观测,对于底部驼峰的形成可以从金属蒸气、小孔和熔池的流动特征进行分析,如图8所示。当底部驼峰形成时,小孔底部熔池所受的力包括:金属蒸气压力 P_v 、熔池自身重力 G 、熔池向下流动产生的动压力 P_m 和表面张力 F_s 。在稳定条件下,将图8中小孔底部熔池形状简化为半球形,此时金属蒸气压力 P_v 、熔池自身重力 G 以及熔池向下流动产生的动压力 P_m 促使熔池向下移动,只有表面张力 F_s 向上作用托住熔池。由此可以得到小孔底部的力在垂直焊接方向上的局部平衡条件为

$$P_v + G + P_m = F_s, \quad (1)$$

$$G = \frac{2\pi\rho gr^3}{3}, \quad (2)$$

$$P_m = \frac{\pi\rho v^2 r^2}{2}, \quad (3)$$

$$F_s = 2\pi\sigma r, \quad (4)$$

式中 ρ 为熔池熔融金属密度, g 为重力加速度, r 为小孔底部半球形熔池的半径, v 为小孔内熔池向下流动的速度, σ 为表面张力系数。而焊接方向上,熔池受力不平衡从而向后流动。

由图3~8可知,在底部驼峰形成过程中,小孔底部被厚厚的熔融金属包裹住,孔内金属蒸气压力增大以及小孔前壁液体凸起高速向下运动将熔融金属推出试件;被推出的熔融金属在表面张力以及内部熔池向后流动特征的共同作用下,改变流动方向,向焊缝熔池的尾部流动,不断向后流动的熔融金属汇聚形成底部驼峰;在底部驼峰前后沿表面张力的影响下,使得流入驼峰内的熔融金属速度大于其流出速度,从而导致驼峰体积增大;当焊道长度达到一定值时,焊道凝固并阻止其前方熔融金属继续向驼峰内部流动,最后驼峰熔池在表面张力和重力作用下达到平衡,继而逐渐凝固并附着在焊缝下表面形成底部驼峰,且焊缝上表面塌陷。

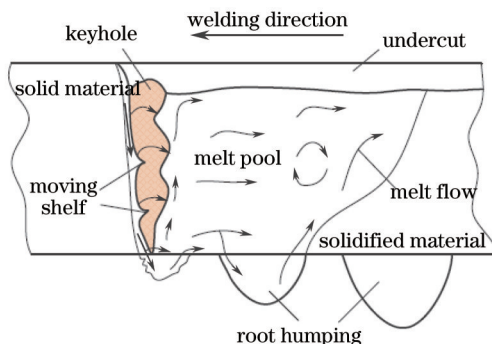


图8 底部驼峰形成时小孔和内部熔池流动示意图

Fig.8 Schematic of keyhole and the internal flow of weld pool for root humping formation stage

3.3 上表面熔池的流动及小孔开口的变化

底部驼峰产生时,采用高速相机拍摄表面熔池以及小孔开口的变化情况如图9所示,其高速相机的拍摄频率为10000 fps。从图9中可以明显观察到小孔后沿熔池低于试件上表面,与图3的“三明治”试验观测结果一致,小孔后沿塌陷导致小孔开口向焊接反方向倾斜。小孔开口逐渐变小,且向焊接反方向倾斜角度加大,如图9(a)~(c)所示;随着焊接过程的进行,小孔前沿熔融金属经过小孔两侧壁高速向后流动,如图9(d)~(g)所示,对应图8中熔池向后流动。随着熔融金属经过侧壁不断地向后流动,此时剧烈金属蒸气向后喷射冲击小孔后沿上部熔池,驱动熔融金属快速向上流动,甚至形成高高的液柱,导致小孔后沿熔池局部向上,小孔开口呈水平,如图9(h)所示,另外由于熔融金属在小孔后沿的上升汇聚压缩了小孔开口使其变小。之后,小孔开口变大并向焊接反方向倾斜,小孔后沿熔池再次低于试件上表面,如图9(i)所示。由于底部驼峰的形成,熔池表面张力不足以克服熔池重力以及熔池的流动特征,导致表面熔融金属材料不足,由此可知,底部驼峰的形成是导致焊缝上表面塌陷的重要原因。

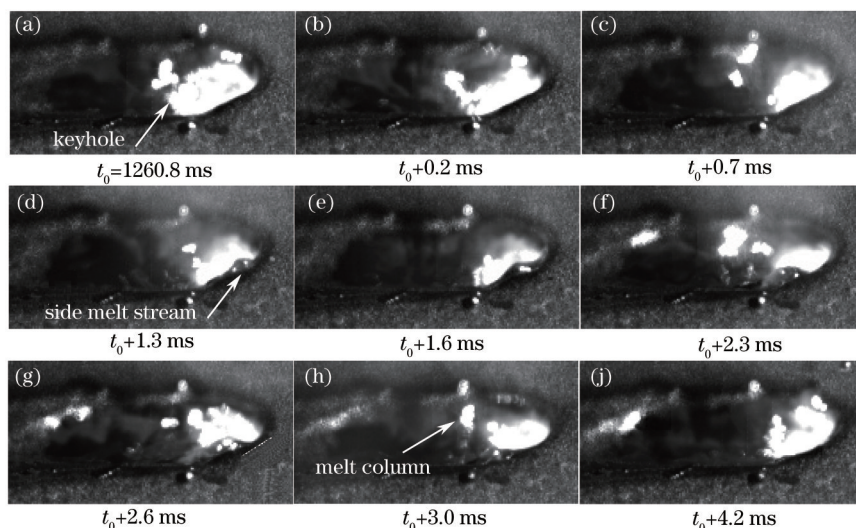


图9 底部驼峰形成时上表面熔池的流动及小孔开口的动态变化

Fig.9 Dynamic process of surface molten pool and the keyhole inlet for root humping formation stage

4 结 论

在底部驼峰形成过程中,由于孔内熔融金属流动不连续,前沿孔壁凸起向下移动以及金属蒸发反冲击力,导致小孔底部熔池形成多个具有轮廓的熔滴;熔滴在表面张力以及熔池内部流动特征的作用下不断向后流动汇聚形成驼峰。同时,由于底部驼峰前后沿温度存在差异,使得从前沿流入驼峰内的熔融金属速度显著大于其流出速度,导致驼峰体积不断变大,当焊道长度达到一定值时,焊道凝固并阻止其前方熔融金属继续向驼峰内部流动,最后驼峰熔池在表面张力和重力作用下达到平衡,最终凝固形成大尺寸驼峰。底部驼峰的形成不仅影响了底部熔池的流动,而且影响上表面熔池的流动状态,导致焊缝上表面塌陷,严重影响焊接质量,后续工作将继续对抑制底部驼峰进行研究。

参 考 文 献

- 1 Shen Yifu, Zhang Shenghai. Current research status and development trends of laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): 103002.
沈以赴, 张盛海. 激光深熔焊接技术的研究与动向[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): 103002.
- 2 Killi A, Zawischa I, Sutter D, *et al.*. Current status and development trends of disk laser technology[C]. SPIE, 2008, 6871: 68710L.
- 3 Zhao Lin, Tsukamoto Susumu, Zhang Yan, *et al.*. Influence of welding parameters on weld depth and porosity in high power fiber laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103004.
赵琳, 塚本进, 张岩, 等. 大功率光纤激光焊接过程中工艺参数对熔深和气孔的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103004.
- 4 Chen Genyu, Zhou Yu, Zhang Mingjun, *et al.*. Study on improving the surface quality of the weld of autogenously laser welding of the thick plate with high power fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103011.
陈根余, 周宇, 张明军, 等. 大功率光纤激光厚板自熔焊焊缝表面质量改善研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103011.
- 5 Karlsson J, Kaplan A F H. Analysis of a fibre laser welding case study, utilising a matrix flow chart[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(9): 4113-4122.
- 6 Pei Yinglei, Wu Aiping, Shan Jiguo, *et al.*. Investigation of humping formation based on melt flow analysis in high-speed laser welding process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(6): 725-730.
裴莹蕾, 吴爱萍, 单际国, 等. 基于熔池流动分析的高速激光焊驼峰焊道形成过程研究[J]. 金属学报, 2013, 49(6): 725-730.
- 7 Thomy C, Seefeldt T, Vollertsen F. Humping effect in welding of steel with single-mode fibre laser[J]. Welding in the World, 2008, 52(5-6): 9-18.
- 8 Berger P, Hügel H, Hess A, *et al.*. Understanding of humping based on conservation of volume flow[J]. Physics Procedia, 2011, 12 (A): 232-240.
- 9 Zhou J, Tsai H L, Wang P C. Transport phenomena and the associated humping formation in laser welding[C]. ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2005. 945-953.
- 10 Ilar T, Eriksson I, Powell J, *et al.*. Root humping in laser welding - an investigation based on high speed imaging[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 27-32.
- 11 Haug P, Rominger V, Speker N, *et al.*. Influence of laser wavelength on melt bath dynamics and resulting seam quality at welding of thick plates[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 49-58.
- 12 Zhang Yi. The Simulation Research on the Keyhole Effect of Deep Penetration Laser Welding Based on a Novel "Sandwich" Method [D]. Changsha: Hunan University, 2005.
张屹. 基于“三明治”新方法的激光深熔焊接小孔效应的模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- 13 Xiangzhong Jin, Lijun Li, Yi Zhang. An experimental study on the keyhole shapes in deep penetration laser welding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41: 779-790.
- 14 Li S, Chen G, Zhang M, *et al.*. Dynamic keyhole profile during high-power deep-penetration laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(3): 565-570.
- 15 Matsunawa A, Semak V. The simulation of front keyhole wall dynamics during laser welding[J]. Journal of physics D: Applied physics, 1997, 30(5): 798.
- 16 Pang Shengyong. A Study on the Transient Keyhole and Moving Weld Pool Behaviors and Mechanisms of Deep Penetration Laser Welding[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
庞盛永. 激光深熔焊接瞬态小孔和运动熔池行为及相关机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- 17 Eriksson I, Gren P, Powell J, *et al.*. New high-speed photography technique for observation of fluid flow in laser welding[J]. Optical Engineering, 2010, 49(10): 100503.

栏目编辑: 张雁