

焊接速度对高速激光焊熔池流动行为的影响

裴莹蕾¹ 单际国^{1,2} 任家烈¹

(¹ 清华大学机械工程系, 北京 100084; ² 清华大学先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要 高速激光焊的多种典型缺陷形成都与熔池流动有关, 深入了解熔池流动行为有助于理解高速焊缺陷的形成机理。采用光纤激光进行高速焊接试验, 分别研究在功率和热输入一定的条件下焊接速度对熔池流动行为的影响。采用高速摄像实时观察熔池表面的流动行为, 通过 Ti 示踪元素考察熔池内部的流动行为。结果表明, 焊接速度提高, 熔池表面液态金属向熔池尾部流动的距离增加, 熔池内部的中心部位液态金属向熔池底部和尾部流动的距离增加, 熔池内部边缘处液态金属流动受焊接速度的影响较小。提高焊接速度, 金属蒸气喷出方向与熔池表面的夹角减小, 金属蒸气对小孔后沿冲击力的水平分量增大, 导致熔池表面液态金属向熔池尾部流动的驱动力增大, 流动距离因而增加。

关键词 激光技术; 高速焊接; 熔池表面流动; 熔池内部流动; 焊接速度

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0503001

Effect of Welding Speed on Melt Flow Behavior in High Speed Laser Welding Process

Pei Yinglei¹ Shan Jiguo^{1,2} Ren Jialie¹

¹Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China
²Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Typical welding defects of the high speed laser welding process have a close relationship with the melt flow of molten pool. The investigation of melt flow behavior can help to further understand the formation mechanism of defects in the high speed welding process. In this study, fiber laser is used to weld austenitic stainless steel sheet. The effect of welding speed on melt flow behavior has been investigated. The surface flow behavior is studied by high speed visual detection system. In addition, the inner flow is studied through Ti tracer method. The results show that with the welding speed increasing, the flow distance of surface flow from keyhole to rear goes up, the molten metal in the middle of molten pool moves to the bottom and rear of pool with a longer distance. The effect of the welding speed on melt flow near the edge of the molten pool is small. It can be accounted that, with the welding speed increasing, the angle between vapour plume and pool surface decreases, the horizontal component of the vapour force will improve, which causes the backward driving force to increase and the flow distance of the surface flow to increase.

Key words laser technique; high speed welding; surface flow of molten pool; inner flow of molten pool; welding speed

OCIS codes 140.3510; 140.3390; 140.3580; 160.3900; 350.3850

1 引言

高速激光焊熔池流动行为是一个复杂的过程, 多种高速焊接典型缺陷的形成都与熔池流动行为有关。文献[1~3]研究认为, 高速焊驼峰焊道的产生与液态金属向熔池尾部的流动密切相关。文献[4~6]实验发现, 焊接速度提高时飞溅和未填满等缺陷形成倾

向更加突出, 这些缺陷的产生与小孔边缘处的液态金属流动有关。文献[7~9]认为, 高速焊缝底部尖峰缺陷的产生与小孔的坍塌和小孔底部液态金属流动有关。尽管国内外同行尝试多种方法研究激光焊熔池流动行为^[5,10,11], 但高速激光焊熔池的流动行为尚不清楚。本文通过高速摄像和 Ti 示踪元素

收稿日期: 2012-12-26; 收到修改稿日期: 2013-01-14

作者简介: 裴莹蕾(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: peiyinglei05@163.com

导师简介: 单际国(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光焊接和焊接冶金等方面的研究。

E-mail: shanjg@tsinghua.edu.cn (通信联系人)

考察了高速激光焊接熔池表面和内部液态金属的流动行为,分别研究了在功率和热输入一定的条件下焊接速度对熔池流动行为的影响规律。

2 试验材料及方法

激光焊接设备为 YLR-2000 型光纤激光器,聚焦光斑直径为 0.13 mm,四轴三联动工作台可实现的最高焊接速度为 24 m/min。焊接试样为厚度 1 mm 的 SUS 304 不锈钢板,采用平板堆焊方法。焊前打磨并用丙酮清洗试样表面油污。离焦量为 0,保护气体是纯度 99.9% 的氩气,气流量为 20 L/min。

采用 Photron SA3 型摄像机对焊接熔池表面流动行为进行视觉检测,采样频率为 6000 frame/s,获得不同焊接速度时熔池表面的图像,通过图像标定提取熔池形状和尺寸,用单位时间内小孔后沿液态金属的流动距离来定量分析熔池表面的流动行为。

利用 100 μm 厚的 Ti 箔作为示踪材料来考察

熔池内部的流动行为,如图 1 所示,金属板右半部分的顶部放置 Ti 箔,左半部分未放置 Ti 箔,从右向左进行高速焊接。焊后将焊缝沿 A-A、B-B、C-C 处切开,其中 A-A 截面用来观察液态金属沿熔深方向(Z 轴)的流动行为,B-B 截面用来观察沿焊接方向(X 轴)的流动行为,C-C 截面用来观察沿熔宽方向(Y 轴)的流动行为。用 Ti 元素在熔池 X、Y、Z 方向的扩散距离来定量表征熔池内部液态金属的流动行为。使用 BX51M-DP72 光镜(OM)和 JSM-7001F 型场发射电镜能谱分析仪(EDS)面扫描分别获得焊缝横截面形貌和元素分布情况。图 2 是当焊接功率为 2 kW,焊接速度为 24 m/min 时焊缝 C-C 截面光镜形貌和 Ti、Fe 元素面扫描结果,图 2(b)中 Ti 元素的分布情况与图 2(a)金相图深颜色部分的对应性较好,故下文用光镜下的金相图来反推 Ti 示踪元素在熔池内部 X、Y、Z 方向上的扩散距离。

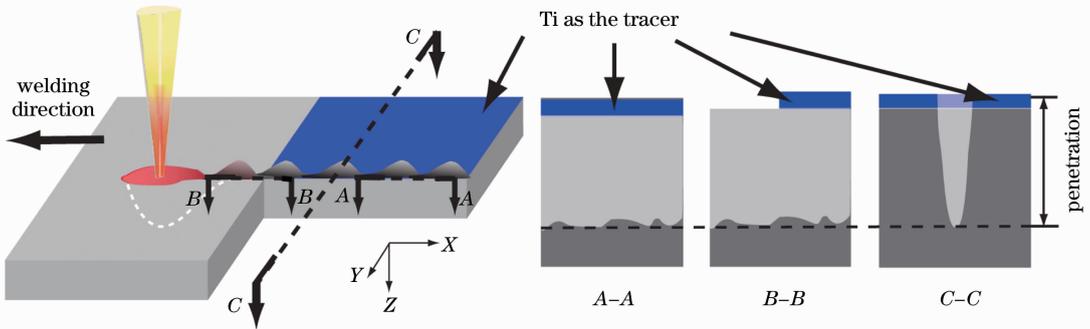


图 1 Ti 箔的放置位置及焊缝典型位置截面示意图

Fig. 1 Schematic of Ti tracer position and typical section of the weld

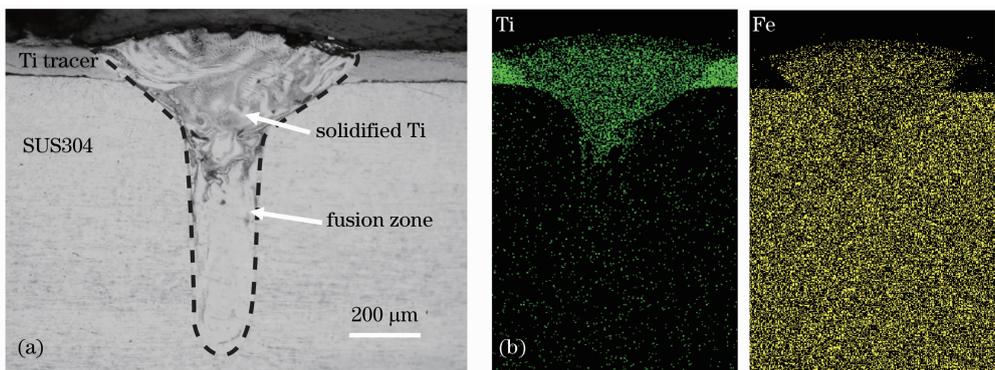


图 2 (a) 焊缝 C-C 截面光镜图及(b)焊缝内的 Ti、Fe 元素 EDS 面扫描图(2000 W, 24 m/min)

Fig. 2 (a) OM picture of C-C section with Ti tracer and (b) EDS picture of Ti, Fe element distribution of C-C section (welding power of 2000 W, welding speed of 24 m/min)

3 试验结果

3.1 焊接速度对熔池表面液态金属流动的影响

图 3 为高速摄像机拍摄的不同时刻、不同焊接

速度下熔池表面的流动行为,对比不同焊接速度下的熔池表面图像发现,随着速度的增加熔池长度增加。当焊接速度为 12 m/min 时,熔池表面流动过

程稳定,少量液态金属从小孔后沿向后上方涌起,随着小孔向前移动,涌起的液态金属迅速铺展到熔池中。当焊接速度为 18 m/min 时,液态金属从小孔后沿高速涌起,涌起方向与熔池表面的夹角约为 60° ,随着小孔的前移,涌起的液态金属向熔池尾部运动,形成金属堆积。随后堆积开始铺展,体积逐渐变小,并最终凝固在焊道表面,形成少量的驼峰。当焊接速度为 24 m/min 时,大量的液态金属从小孔后沿涌起,涌起方向与熔池表面的夹角约为 45° ,涌起的液态金属小部分脱离熔池形成飞溅,大部分向熔池尾部运动形成金属堆积。随后堆积被向熔池尾部流动的液态金属填充长大,热源远离后,金属堆积

来不及铺展,凝固形成驼峰。

为了定量研究不同焊接速度下熔池表面的液态金属流动行为,引入单位时间表面流动距离来描述熔池表面流动的剧烈程度。图 3 以小孔后沿的液态金属为标定物,图中虚线箭头(图 3 中的 A, B, C 点处)标出了间隔 0.167 ms 小孔后沿液态金属的相对位置,分别统计了 0.333 ms 内不同焊接速度下液态金属流动的距离。焊接速度为 12, 18, 24 m/min 时,标定物的流动距离分别为 0.37, 0.51, 0.84 mm。

由此可见,随着焊接速度的提高,液态金属从小孔后沿涌起的金属量增多,涌起角度与熔池表面的夹角减小,小孔后沿液态金属向熔池尾部流动的距离增加。

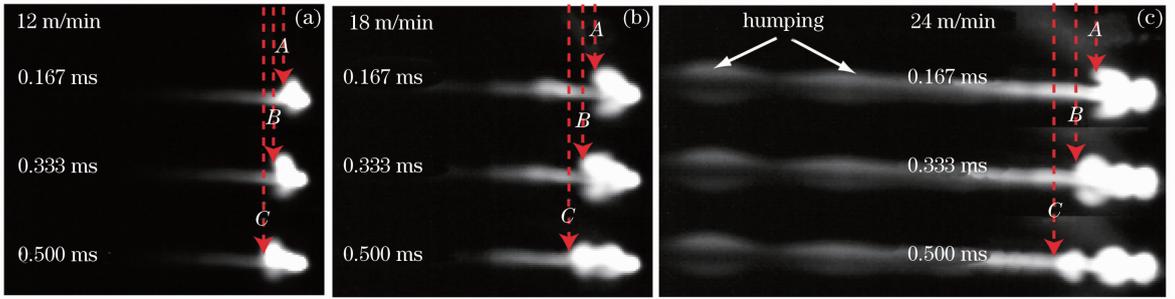


图 3 高速拍摄不同焊接速度下熔池表面流动行为(6000 frame/s)

Fig. 3 Surface flow behavior under different welding speeds (6000 frame/s)

3.2 焊接速度对熔池内部液态金属流动的影响

图 4 为热输入和功率一定的条件下,不同焊接速度下焊缝的 A-A 截面图。图 4(a)为典型 A-A 截面 Ti 元素的分布示意图,图 4(b)~(d)分别为实际

焊缝的截面。为了表征熔池沿 Z 轴方向的流动状态,定义参数 L_1 为 Ti 元素实际扩散的距离,参数 L_1/L_2 为 Ti 元素的相对扩散距离。对比 1000 W, 12 m/min[图 4(c)]与 2000 W, 24 m/min[图 4(b)]

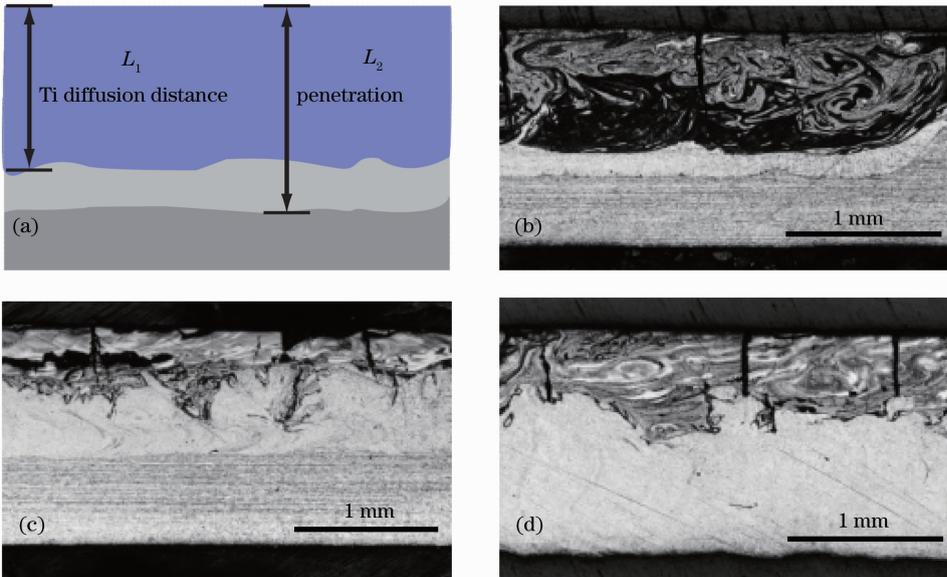


图 4 不同工艺参数下 A-A 截面 Ti 元素的分布。(a) A-A 截面 Ti 元素的分布示意图;
(b) 2000 W, 24 m/min; (c) 1000 W, 12 m/min; (d) 2000 W, 12 m/min

Fig. 4 Ti tracer distribution under different welding parameters on A-A section. (a) Schematic of melt flow on A-A section; (b) 2000 W, 24 m/min; (c) 1000 W, 12 m/min; (d) 2000 W, 12 m/min

两组参数,发现在热输入不变的条件下,提高焊接速度,熔池内部液态金属向熔池底部流动的趋势更加明显,相对扩散距离(L_1/L_2)从低速下的 40% 提高到了高速下的 80%,实际扩散距离(L_1)从低速下的 0.45 mm 提高到了 0.75 mm。对比 2000 W, 12 m/min[图 4(d)]与 2000 W, 24 m/min[图 4(b)]两组参数,发现在功率不变的情况下提高焊接速度,熔池内部液态金属向熔池底部流动的距离也有增加趋势,相对扩散距离由低速下的 40% 提高到高速下的 80%,实际扩散距离由低速下的 0.5 mm 提高到了 0.75 mm。据此可以认为,焊接速度的提高能够显著提高熔池内部液态金属在 Z 向上的流动距离。

图 5 为热输入和功率一定的条件下,不同焊接速度下焊缝的 B-B 截面图。图 5(a)为典型 B-B 截面 Ti 元素的分布示意图。Ti 箔被激光加热熔化,在金属流(图 5 中的 Fe flow)的作用下向熔池尾部

流动遇到已经凝固的金属后改变方向,并从熔池底部向前翻滚,最后凝固在熔池中。图 5(b)~(d)分别为实际焊缝的 B-B 截面,从图中可以明显看出, Ti 元素沿焊接反方向向熔池尾部扩散。

对比 1000 W, 12 m/min[图 5(c)]与 2000 W, 24 m/min[图 5(b)]两组参数,发现在热输入不变的条件下提高焊接速度, Ti 元素向熔池尾部扩散的距离增加,扩散距离从低速下的 0.6 mm 提高到了 2.2 mm。对比 2000 W, 12 m/min[图 5(d)]与 2000 W, 24 m/min[图 5(b)]两组参数,发现在功率不变的情况下提高焊接速度, Ti 元素向熔池尾部扩散的距离也有增加的趋势,扩散距离从低速下的 0.9 mm 提高到了 2.2 mm。据此可以认为,焊接速度的提高能够显著提高 Ti 元素向熔池尾部扩散的距离,即熔池内部液态金属沿 Z 向流动的距离随着焊接速度的提高而增加。

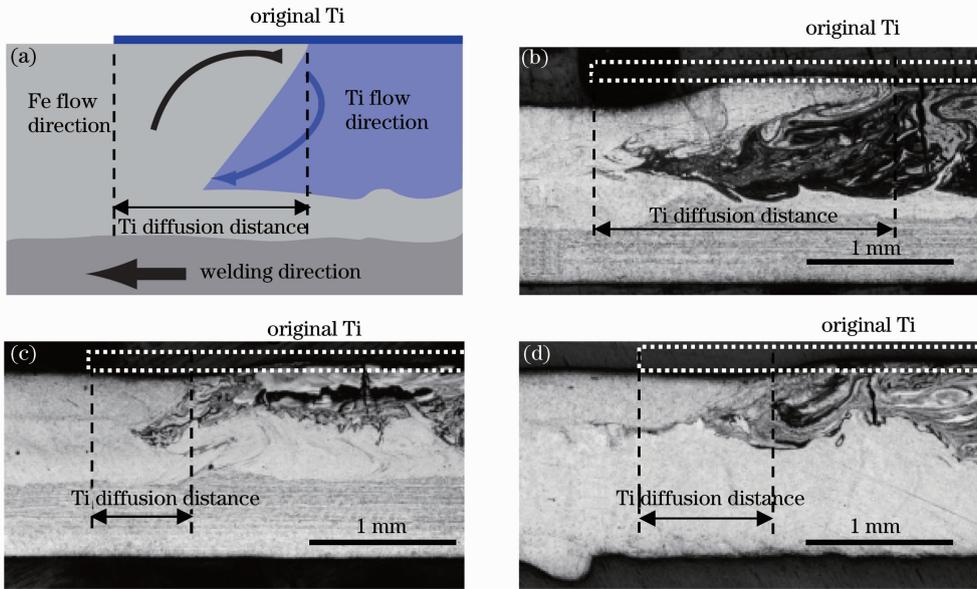


图 5 不同工艺参数下 B-B 截面 Ti 元素的分布。(a) B-B 截面 Ti 元素的分布示意图; (b) 2000 W, 24 m/min; (c) 1000 W, 12 m/min; (d) 2000 W, 12 m/min

Fig. 5 Ti tracer distribution under different welding parameters on B-B section. (a) Schematic of melt flow on B-B section; (b) 2000 W, 24 m/min; (c) 1000 W, 12 m/min; (d) 2000 W, 12 m/min

图 6 为热输入和功率一定的条件下,不同焊接速度时焊缝的 C-C 截面。图 6(a)~(c)左侧为各参数下实际焊缝的截面,右侧为各参数下对应的熔池流动示意图。Ti 元素向熔池底部扩散,在熔池内部的中心部位扩散得深,在靠近熔池边缘部位扩散得浅,扩散距离沿熔宽方向呈现中间高两边低的分布状态。

对比 1000 W, 12 m/min[图 6(b)]与 2000 W, 24 m/min[图 6(a)]两组参数,发现在热输入不变的

情况下提高焊接速度,熔池中心部位 Ti 向熔池底部扩散的距离增加,熔池边缘部位 Ti 扩散距离没有发生变化。对比 2000 W, 12 m/min[图 6(c)]与 2000 W, 24 m/min[图 6(a)]两组参数,发现在功率不变的情况下提高焊接速度,熔池中心部位 Ti 向熔池底部扩散的距离也有增加,熔池边缘部位 Ti 扩散距离也未发生变化。据此认为,焊接速度的提高极大地增强了熔池中心部位液态金属向熔池底部的流动,对于熔池边缘部位金属流动的影响较小。

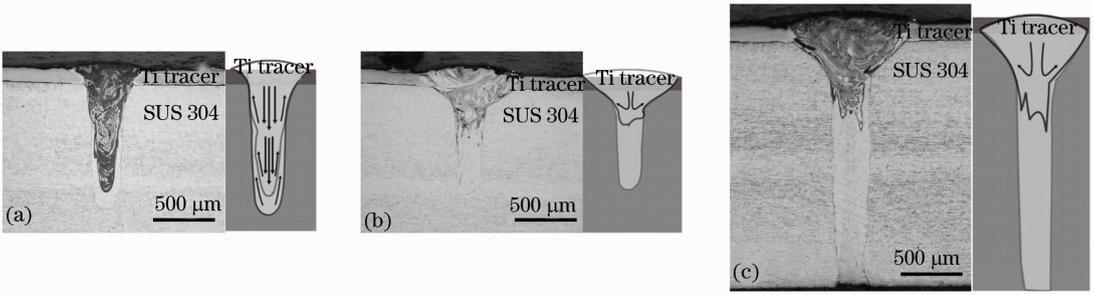


图6 不同工艺参数下 C-C 截面 Ti 元素的分布(左)及熔池流动示意图(右)。(a) 2000 W, 24 m/min; (b) 1000 W, 12 m/min; (c) 2000 W, 12 m/min

Fig. 6 Ti tracer distribution of the weld (left) and schematic of Ti tracer flow (right) under different welding parameters on C-C section. (a) 2000 W, 24 m/min; (b) 1000 W, 12 m/min; (c) 2000 W, 12 m/min

4 分析与讨论

图7为高速拍摄不同焊接速度下小孔处金属蒸气的喷射角度,焊接速度为12,18,24 m/min时,金属蒸气的喷射角度分别为75°,60°,45°,当焊接速度增大时,金属蒸气的喷出方向与熔池表面的夹角减小。文献[12,13]研究了小孔形态随焊接速度的变化情况,发现随着焊接速度的提高小孔向焊接方向

倾斜,小孔形态的变化造成了金属蒸气喷射方向的变化,这与本文的研究结果相吻合。喷射角度的减小可能造成金属蒸气对小孔后沿的冲击力 F_{vapour} 的水平分量 ($F_{\text{vapour}} \times \cos \theta$) 逐渐增大[图7(d)],这可能是导致熔池表面液态金属向熔池尾部流动距离增加的重要原因。

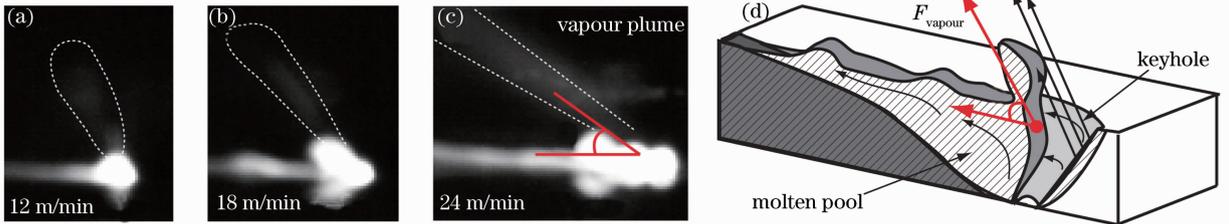


图7 不同焊接速度下熔池金属蒸气的喷射角度。(a) 12 m/min; (b) 18 m/min; (c) 24 m/min; (d)熔池表面液态金属流动受力分析

Fig. 7 Angle between vapour plume and pool surface under different welding speeds. (a) 12 m/min; (b) 18 m/min; (c) 24 m/min; (d) force analysis of the surface flow

关于熔池内部液态金属的流动状态,包括焊接速度增加时熔池内部中心部位液态金属向熔池底部和熔池尾部流动的距离增加,以及熔池内部边缘部位液态金属流动受焊接速度的影响较小,这些实验现象的机理仍需进行深入的实验研究和理论分析。

5 结论

基于熔池流动分析研究了焊接速度对高速激光熔池表面及内部流动行为的影响作用。结果表明,随着焊接速度的提高,单位时间内熔池表面的液态金属从小孔后沿向熔池尾部流动的距离增加。熔池内部的液态金属在熔池中心部位向熔池底部和熔池尾部流动的距离增加,熔池内部边缘部位的液态

金属的流动行为受焊接速度的影响较小。

焊接速度的提高导致金属蒸气从小孔中喷出的方向与熔池表面的夹角减小,造成金属蒸气对小孔后沿冲击力的水平分量增大,熔池表面液态金属向熔池尾部流动的驱动力增大,流动距离因而增加。关于焊接速度对熔池内部液态金属流动行为的影响机理仍需进一步的实验研究和理论分析。

参考文献

- 1 R. Fabbro. Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010, **43**(44): 445501
- 2 P. Berger, H. Hugel, A. Hess *et al.*. Understanding of humping based on conservation of volume flow [J]. *Phys. Procedia*, 2011, **12**(part A): 232~240

- 3 Pei Yinglei, Shan Jiguo, Ren Jialie. Study of humping tendency and affecting factors in high speed laser welding of stainless steel sheet [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2012, **48**(12): 1415~1421
裴莹蕾, 单际国, 任家烈. 不锈钢薄板高速激光焊驼峰焊道形成倾向及其影响因素[J]. *金属学报*, 2012, **48**(12): 1415~1421
- 4 Y. Kawahito, M. Mizutani, S. Katayama. High quality welding of stainless steel with 10 kW high power fiber laser [J]. *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2009, **14**(4): 588~594
- 5 S. Katayama, Y. Kawahito. Elucidation of phenomena in high power fiber laser welding, and development of prevention procedures of welding defects [C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 71951R
- 6 Y. Kawahito, M. Mizutani, S. Katayama. Elucidation of high-power fiber laser welding phenomena of stainless steel and effect of factors on weld geometry [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, **40**(19): 5854~5859
- 7 P. S. Wei, K. C. Chuang, J. S. Ku *et al.*. Mechanisms of spiking and humping in keyhole welding [J]. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Tech.*, 2012, **2**(3): 383~393
- 8 P. S. Wei. Thermal science of weld bead defects: a review [J]. *J. Heat Transf.*, 2011, **133**(3): 031005
- 9 P. S. Wei, K. C. Chuang, T. Debroy *et al.*. Scaling of spiking and humping in keyhole welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2011, **44**(24): 245501
- 10 Cui Haichao, Lu Fenggui, Tang Xinhua. Experimental research on fluidity of laser welded molten pool [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603004
崔海超, 芦凤桂, 唐新华. 激光焊接熔池流动性试验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603004
- 11 Ye Xiaohu, Chen Xi. Simulation of the fluid flow and heat transfer in laser heating melt pool using a region-dividing method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(9): 855~858
叶晓虎, 陈 熙. 激光加热熔池流动和传热的分区数值模拟[J]. *中国激光*, 2002, **29**(9): 855~858
- 12 R. Fabbro, K. Chouf. Keyhole modeling during laser welding [J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **87**(9): 4075~4083
- 13 R. Fabbro, S. Slimani, I. Doudet *et al.*. Experimental study of the dynamical coupling between the induced vapour plume and the melt pool for Nd-YAG CW laser welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**(2): 394~400

栏目编辑: 宋梅梅