

# 单/双光束激光焊接熔池行为及焊缝成形特性比较

马国龙, 李俐群\*, 陈彦宾

哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 以不锈钢为研究对象, 对比研究了单、双光束激光焊接过程中的熔池形态和焊缝形貌, 建立了二者之间的相关性。结果表明, 单、双光束激光焊接具有不同的熔池形态演变过程, 光斑间距会影响双光束激光焊接熔池尺寸及焊缝形貌。双光束焊接过程中匙孔之间的相互作用垂直于双光斑连线方向, 形成强烈的熔体流动, 而单光束焊接熔体向匙孔周围均匀流动。熔体流动方式的不同是导致单、双光束焊缝形貌差异的关键。

**关键词** 激光技术; 双光束激光焊接; 熔池行为; 焊缝形貌

**中图分类号** TG456.7

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0202002

## Comparative Study of Molten Pool Behavior and Weld Formation Characteristic in Single/Dual Beam Laser Welding

Ma Guolong, Li Liqun, Chen Yanbin

State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** With stainless steel as research target, the molten pool shape and weld morphology during the process of single/dual beam laser welding are comparatively studied, and the relationship between both of them is established. The results indicate that the evolution processes of molten pool shape are different for single and dual beam laser welding and the molten pool size and weld morphology of dual beam laser welding are influenced by the spot spacing. As for the process of dual beam laser welding, the interaction of two keyholes is perpendicular to the connection line of the two laser beams which induces an enhanced melt flow, while as for that of single beam laser welding, the melts flow radiantly and evenly from the keyhole. The difference between melt flow patterns is the key to induce the difference in weld morphology under single/dual beam laser welding.

**Key words** laser technique; dual beam laser welding; molten pool behavior; weld morphology

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

## 1 引言

激光焊接具有焊接效率高、变形小等优点, 已广泛应用于汽车、航空航天等众多领域。但是, 由于激光能量密度高, 在激光深熔焊过程中容易发生匙孔不稳定和熔池剧烈波动的现象, 因此焊缝成形质量差。为了改善单激光焊接焊缝质量, Xie<sup>[1]</sup>提出了一种双光束激光焊接方法以提高焊接过程的稳定性。研究表明, 双光束激光焊接可以明显改善焊缝成形质量<sup>[2-3]</sup>、减少气孔缺陷<sup>[4-5]</sup>、抑制焊接裂纹产生<sup>[6]</sup>以及改善焊缝微观组织特性<sup>[7-8]</sup>。

焊接过程中匙孔稳定性以及熔池行为是影响焊缝质量的重要因素。目前国内外研究主要集中于匙孔稳定性, 对熔池行为的研究较少。Xie<sup>[1]</sup>采用高速摄像方法对比了单/双光束激光焊接低碳钢过程中的等离子体形态, 发现双光束焊接过程中等离子体稳定性优于单光束焊接的, 间接证明了双光束焊接过程的稳定性。

**收稿日期:** 2016-09-07; **收到修改稿日期:** 2016-10-13

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFB1102100)

**作者简介:** 马国龙(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事双光束激光焊接方面的研究。E-mail: guolongma@163.com

**导师简介:** 陈彦宾(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: chenyb@hit.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: liliquan@hit.edu.cn

Haboudou 等<sup>[9]</sup>采用同轴 CMOS (互补金属氧化物半导体) 系统直接观察了单/双光束焊接铝合金过程中的匙孔尺寸,发现双光束焊接过程中的匙孔尺寸大于单光束的且无剧烈波动,双光束焊接气孔率明显减小。Shibata 等<sup>[10-11]</sup>采用原位 X 射线成像系统观察了双光束焊接过程中不同光斑间距下的匙孔形状,发现随着光斑间距的增大,匙孔深度减小,宽度增大,这有利于提高焊接稳定性和减少气孔率。

与单光束激光焊接相比,双光束焊接具有两束激光,即两个热源,这必然引起焊接过程中熔池行为的差异,进而导致焊缝形貌的差异。本文以不锈钢为研究对象,采用高速摄像系统对比研究了单、双光束激光焊接过程中的熔池行为,分析了光斑间距对双光束焊接熔池行为的影响,并分析了单、双光束焊接焊缝形貌,建立了熔池行为与焊缝成形特性的相关性。

## 2 试验材料及方法

试验所用材料为 321 不锈钢,试验件规格为 150 mm×75 mm×3.5 mm,其化学成分见表 1。试验采用平板堆焊的方式,以纯度为 99.9% (体积分数) 工业氩气作为保护气,试验前用砂纸打磨试验件表面去除氧化层,然后用酒精擦拭干净。

表 1 321 不锈钢的化学成分(质量分数,%)  
Table 1 Chemical compositions of stainless steel (mass fraction, %)

Element	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Ti	Fe
Content	0.045	1.08	0.47	17.02	9.02	0.034	0.0065	0.22	Bal.

试验所用光纤激光器的最大输出功率为 10 kW,波长为 1.07 μm,光束直径为 0.26 mm。双光束激光通过安装在焊接头中的分光模块获得,试验采用双光束串行排布方式,焦点位于试验件表面。图 1 为单/双光束的激光能量密度分布示意图。具体焊接工艺参数见表 2。

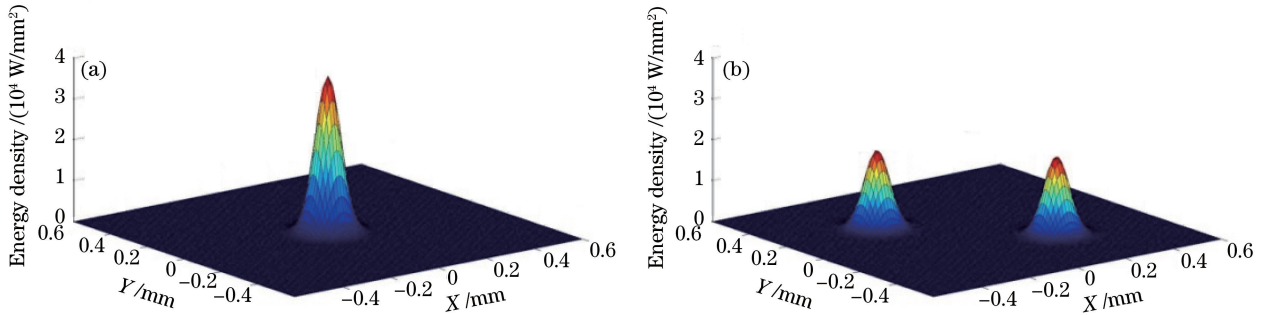


图 1 激光能量密度分布。(a) 单光束; (b) 双光束(光斑间距  $L=0.6$  mm)

Fig. 1 Laser energy density distributions. (a) Single beam; (b) dual beam (spot spacing  $L=0.6$  mm)

表 2 激光焊接工艺参数

Table 2 Process parameters in laser welding

Welding parameter	Content
Laser power	2 kW
Dual beam energy ratio	50:50
Spot spacing ( $L$ )	0 mm (single beam), 0.6 mm, 0.9 mm
Beam configuration	Tandem
Welding speed ( $V_w$ )	0, 1, 2, 4 m/min
Flow rate of shielding gas	20 L/min

试验过程中采用高速摄像机实时观察熔池动态行为以及匙孔形态,数据采集频率为 4000 frame/s。采用半导体脉冲激光作为辅助光源以照亮焊接区域,其波长为 808 nm,最大脉冲周期为 10 μs。高速摄像镜头配备波长为 808 nm 的滤光镜以去除等离子体对采集图像的干扰。试验装置如图 2 所示。

焊后将焊接接头切割、研磨、抛光后在质量分数为 10% 的三氧化铬溶液中进行电解腐蚀;采用金相显微镜观察焊缝表面和横截面形貌。

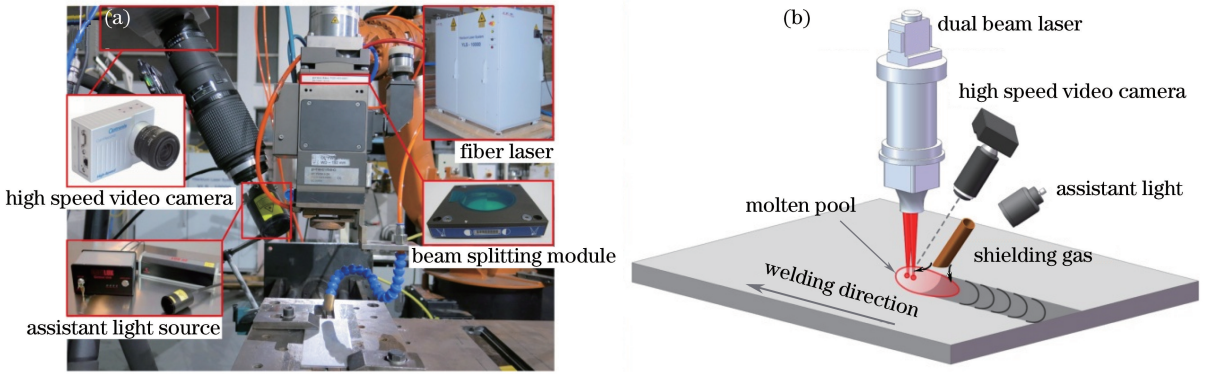


图 2 焊接试验装置。(a) 试验设备；(b) 焊接过程示意图

Fig. 2 Experimental setup of laser welding. (a) Experimental equipment; (b) schematic diagram of welding process

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 初始阶段熔池演变及尺寸分析

为了清楚地研究焊接过程中的熔池行为,将焊接过程分为初始阶段以及稳定焊接阶段。在实际焊接过程中,由于初始阶段即熔池形成阶段持续的时间较短,因此为了更准确地研究该过程,将点焊作为熔池形成阶段的扩展加以研究,以期获得这一过程的典型特征。

图 3 所示为单光束焊接时的熔池形态演变过程。可以发现,当激光开始辐射到工件表面上时,由于激光能量密度高,且工件生成的熔体少,在金属蒸气反冲力的作用下熔体被排出熔池形成熔体飞溅,如图 3(a)所示。随着辐照时间的增加,一个小的熔池开始生成且尺寸不断增大,熔池形状近似圆形,如图 3(c)、(f)所示。熔池中只有一个匙孔存在,焊接过程中匙孔和熔池均存在剧烈的无规则波动,如图 3(b)、(d)中红色箭头所示。

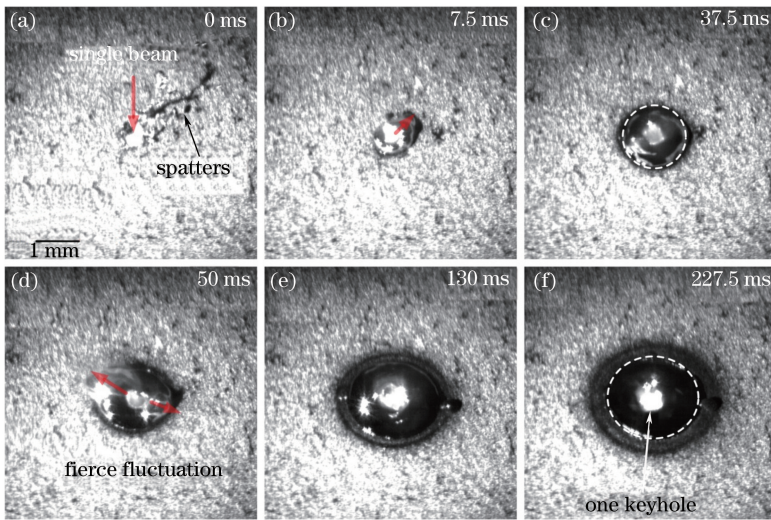


图 3 单光束焊接时熔池形态演变过程

Fig. 3 Evolution process of molten pool shape in single beam laser welding

图 4 所示为光斑间距为 0.6 mm 时双光束焊接熔池形态演变过程。图 4 中将平行于双光束光斑中心的连线的方向设定为 X 方向,垂直于连线的方向设定为 Y 方向。可以发现,其熔池形态演变过程明显不同于单光束焊接的。当双光束激光辐射到试验件表面时,由于每束激光能量密度仅为单光束辐射的 1/2,因此没有飞溅产生,而是分别形成一个单独的小熔池,如图 4(a)所示。在很短的时间(约 5 ms)内,两个小熔池分别扩展形成一个大的熔池;此时熔池呈椭圆形,其长轴平行于 X 方向,如图 4(b)所示。此后熔体沿着熔池 Y 方向推开,熔池 Y 方向尺寸迅速增大并超过 X 方向尺寸,形成长轴平行于 Y 方向的椭圆形熔池,如图 4(c)所示。由此可以推测,当光斑间距为 0.6 mm 时,在 37.5 ms 时间内熔池形状完成了椭圆形(X 方向长轴)-圆

形-椭圆形(Y方向长轴)的演变。熔池中存在一个沿X方向拉长的匙孔,焊接过程中匙孔稳定性相比单光束焊接的高,且仅在熔池Y方向存在剧烈波动。

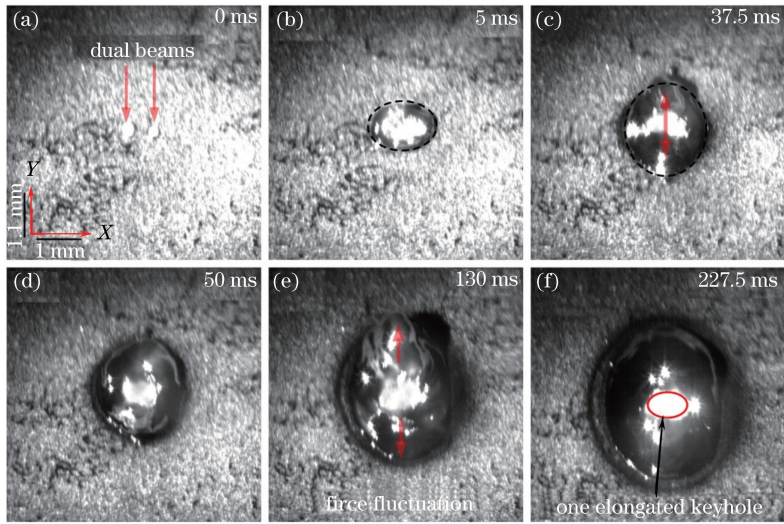


图 4 光斑间距为 0.6 mm 时的双光束焊接熔池形态演变过程

Fig. 4 Evolution process of molten pool shape in dual beam laser welding for spot spacing of 0.6 mm

图 5 所示为光斑间距为 0.9 mm 时双光束焊接熔池形态的演变过程。该过程与图 4 所示的过程大致相同,熔池形状同样存在椭圆形(X方向长轴)-圆形-椭圆形(Y方向长轴)的演变过程。由于光斑间距的增大,演变过程呈现出不同的特征。首先,演变时间变长。从图 5(d)可以发现,在大约 130 ms 时熔池 X 和 Y 方向尺寸相近,熔池形状由椭圆形转变为圆形,这一时间远大于光斑间距为 0.6 mm 时所用时间。其次,熔池中存在两个分开的匙孔,虽然焊接过程中熔体仍然沿 Y 方向振荡,但是匙孔和熔池的稳定性与光斑间距为 0.6 mm 时的相比有所提高。

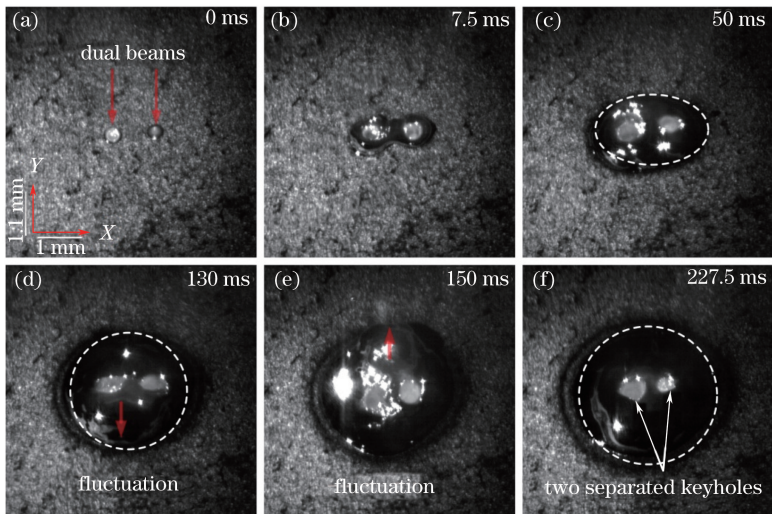


图 5 光斑间距为 0.9 mm 时的双光束焊接熔池形态的演变过程

Fig. 5 Evolution process of molten pool shape in dual beam laser welding for spot spacing of 0.9 mm

为了定量分析单、双光束焊接过程中熔池的尺寸变化,对不同辐照时间下的熔池尺寸进行了测量。图 6 所示为熔池 X 和 Y 方向尺寸随辐照时间的变化。可以发现,双光束焊接时熔池 X 和 Y 方向尺寸均大于单光束焊接的;随着光斑间距的增大,熔池 X 方向尺寸增大,但 Y 方向尺寸减小。

图 7 为单、双光束焊接焊缝表面面貌。可以发现,单光束焊接熔池为圆形,双光束焊接熔池为长轴在 Y 方向的椭圆形。最终熔池 X 和 Y 方向的尺寸见表 3。

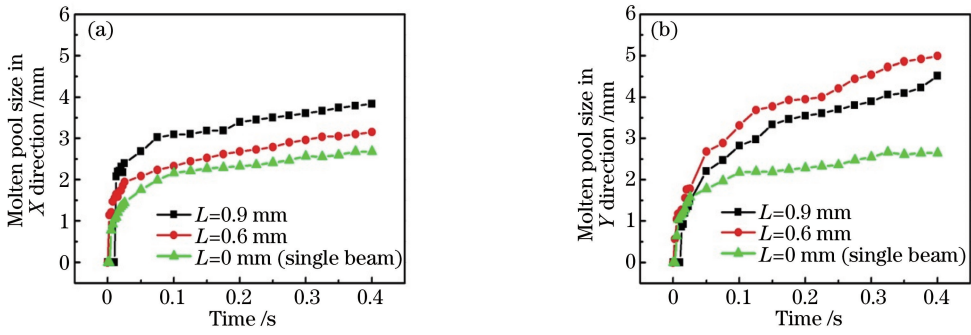


图 6 单/双光束焊接熔池尺寸变化。(a) X 方向; (b) Y 方向

Fig. 6 Variation of molten pool size in single/dual beam laser welding. (a) X direction; (b) Y direction

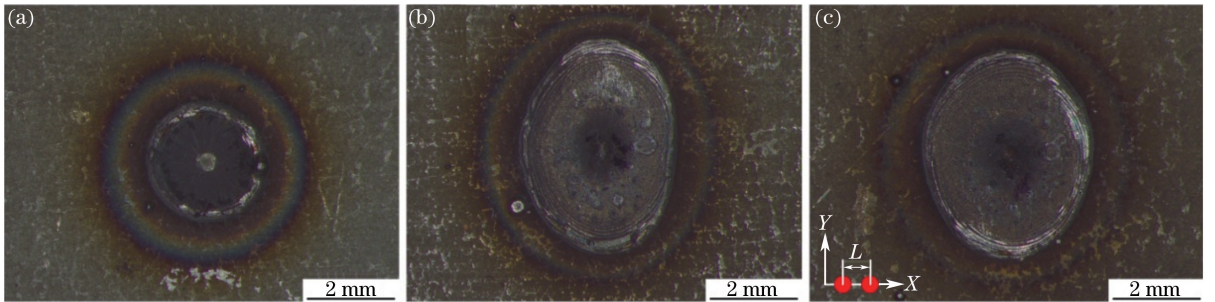


图 7 单/双光束焊接焊缝表面形貌 (辐照时间为 0.54 s)。(a) 单光束; (b) 双光束,  $L=0.6$  mm; (c) 双光束,  $L=0.9$  mm

Fig. 7 Weld morphology of single/dual beam laser welding (irradiation time is 0.54 s).

(a) Single beam; (b) dual beam,  $L=0.6$  mm; (c) dual beam,  $L=0.9$  mm

表 3 单/双光束焊缝表面尺寸

Table 3 Weld surface size of single/dual beam laser welding

Spot spacing /mm	0 (single beam)	0.6	0.9
Size of X direction /mm	2.9	3.7	4.0
Size of Y direction /mm	2.9	5.2	5.0

### 3.2 稳定焊接阶段熔池形态及焊缝形貌

对单、双光束焊接稳定阶段的熔池形态进行了实时观察,结果如图 8 所示,其中熔池及匙孔轮廓用红色线标出。对熔池长度( $X$ )和宽度( $Y$ )进行了测量,结果见表 4。可以发现,单光束焊接时熔池和匙孔波动较大,易产生飞溅;熔池长度和宽度分别为 3.5 和 1.4 mm。当双光束焊接光斑间距为 0.6 mm 时,熔池中形成两个匙孔;由于两匙孔距离较近,焊接过程中彼此相互作用强烈,会产生两匙孔贯通的现象;相比单光束焊接稳定性得到了提高。当光斑间距为 0.9 mm 时,熔池中仍然形成了两个匙孔,但两个匙孔的距离增大,相互

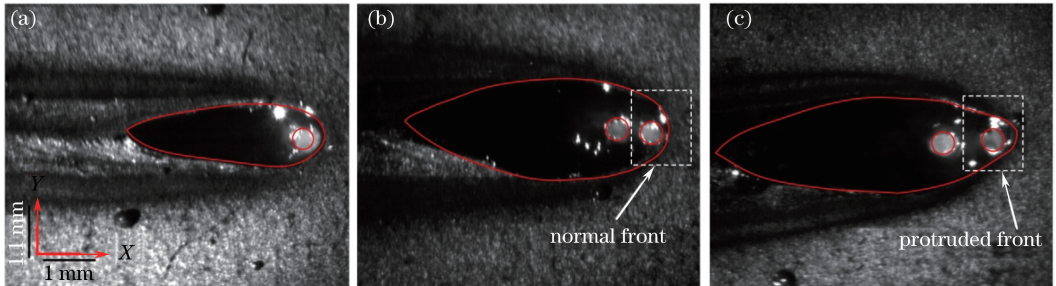


图 8 焊接速度为 1 m/min 时的单/双激光焊接稳定焊接阶段的熔池形态。(a) 单光束; (b) 双光束,  $L=0.6$  mm;

(c) 双光束,  $L=0.9$  mm

Fig. 8 Molten pool shape at the stable stage of single/dual beam laser welding for welding speed of 1 m/min.

(a) Single beam; (b) dual beam,  $L=0.6$  mm; (c) dual beam,  $L=0.9$  mm

作用减弱,匙孔和熔池稳定性得到提高。此外,在该试验条件下,熔池前端形成凸起的形状,这也与匙孔相互作用减弱导致熔池 Y 方向流动减弱有关。

表 4 单/双光束焊接稳定焊接阶段熔池尺寸

Table 4 Molten pool size at the quasi-steady stage of single/dual beam laser welding

Spot spacing /mm	0 (single beam)	0.6	0.9
Molten pool length (X) /mm	3.5	4.7	5.3
Molten pool width (Y) /mm	1.4	2.9	2.1

图 9 为单、双光束焊接焊缝形貌,对不同焊接速度下的焊缝成形数据进行统计,结果如图 10 所示。可以发现,单光束焊缝具有最大的熔深和最小的熔宽;在双光束焊接条件下,随着光斑间距的增大,焊缝熔深和熔宽均减小。

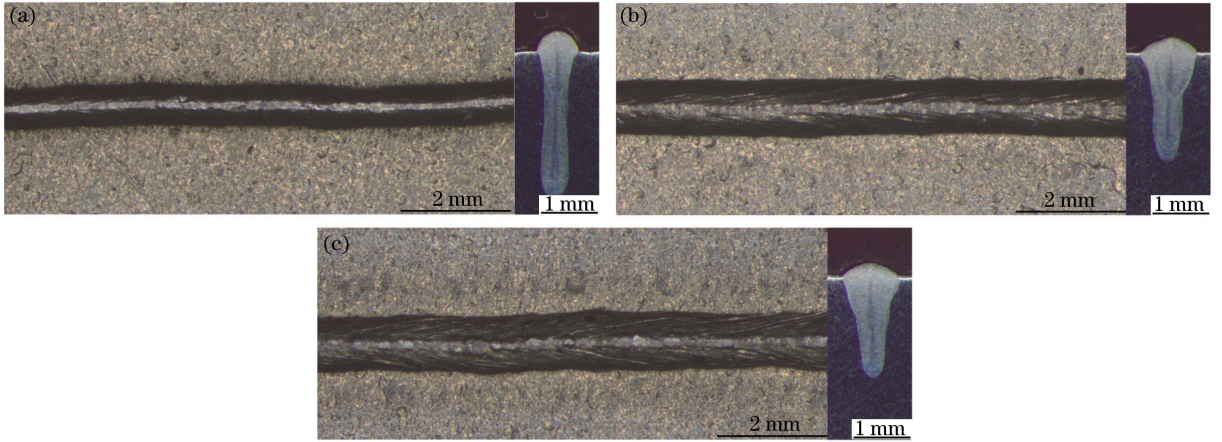


图 9 焊接速度为 4 m/min 时的单/双光束激光焊缝形貌。(a) 单光束; (b) 双光束,  $L=0.6$  mm; (c) 双光束,  $L=0.9$  mm

Fig. 9 Weld morphology of single/dual beam laser welding for welding speed of 4 m/min. (a) Single beam; (b) dual beam,  $L=0.6$  mm; (c) dual beam,  $L=0.9$  mm

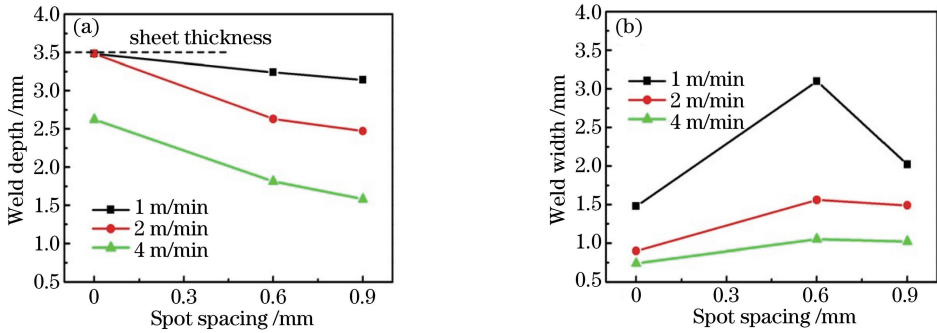


图 10 不同焊接速度下单/双光束焊缝尺寸。(a) 熔深; (b) 熔宽

Fig. 10 Weld sizes of single/dual beam laser welding under different welding speeds. (a) Weld depth; (b) weld width

### 3.3 熔池行为与焊缝成形相关性

焊接过程中热传输以及熔池流动行为是影响熔池形状以及焊缝成形的重要因素。由于双光束焊接过程中采用两束激光即两个热源,这会引起焊接过程中熔池相关特征的差异。首先,单、双光束焊接的有效热源尺寸不同。对于单光束焊接, X 和 Y 方向的有效热源尺寸均为 0.26 mm(即光斑直径);对双光束焊接,由于光斑间距的存在, X 方向的尺寸增大, Y 方向尺寸仍为 0.26 mm。其次,单、双光束焊接的熔池流动方式不同。Hu 等<sup>[12-13]</sup>采用数值模拟计算的方式对单、双光束点焊过程中的熔池流动进行了研究,如图 11 所示,发现由于两个匙孔的相互作用,在垂直于双焦点连线的方向(即 Y 方向)形成了强烈的熔体流动,使得 Y 方向熔体流动速度大于 X 方向的;经计算其最大流速可达 28 cm/s;而单光束焊接时各方向熔池流动速度相近,最大流速仅为 12 cm/s。

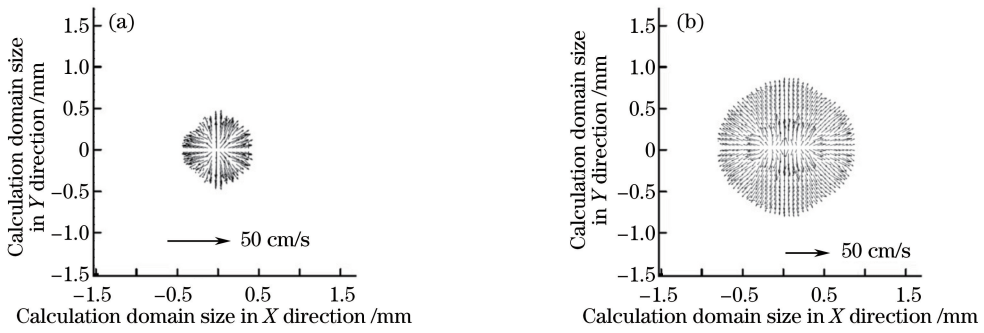


图 11 单/双光束激光焊接熔体流动方式<sup>[12]</sup>。(a) 单光束；(b) 双光束,  $L=0.4$  mm

Fig. 11 Melt flow patterns of single/dual beam laser welding. (a) Single beam; (b) dual beam,  $L=0.4$  mm

图 12 为焊接初始阶段熔池形态演变机制示意图。分析认为,在激光开始辐照的  $t_0$  时刻,由于双光束的有效热源尺寸大于单光束的,且匙孔相互作用较弱,因此双光束熔池 X 方向尺寸大于 Y 方向尺寸,形成长轴在 X 方向的椭圆形熔池;随着光斑间距的增大,有效热源尺寸也增大,因此熔池 X 方向尺寸也增大,如图 6(a)所示。随着辐照时间的增加,两匙孔之间的相互作用增强,导致熔池 Y 方向的热传输以及熔池流动加剧,因此熔池 Y 方向的扩展速度大于 X 方向的;激光辐照到  $t_1$  时刻, X、Y 方向熔池尺寸近似相等,形成圆形熔池;而光斑间距的增大会导致两匙孔相互作用减弱,使得熔池 Y 方向流速降低,因此光斑间距为 0.9 mm 时,熔池在激光辐照 130 ms 后才转变为圆形,而光斑间距为 0.6 mm 时这一时间小于 37.5 ms。在 Y 方向熔体流动加剧的持续作用下,双光束焊接熔池的 Y 方向尺寸超过 X 方向尺寸,进而形成长轴在 Y 方向的椭圆形熔池,如图 12(b)所示。由于光斑间距增大导致 Y 方向流速降低,因此在同样的辐照时间下,光斑间距为 0.9 mm 时的熔池 Y 方向尺寸小于 0.6 mm 时的尺寸,如图 6(b)所示。单光束焊接时,由于各方向熔体流速大致相等,因此熔池始终呈圆形;且由于熔体流速低于双光束焊接的,因此最终形成的熔池尺寸小于双光束焊接的。此外,两匙孔相互作用也会一定程度地促进熔池 X 方向的热传输。根据表 3 可知,光斑间距为 0.9 mm 时,单、双光束焊接下熔池 X 方向尺寸分别为 2.9 mm 和 4.0 mm,二者相差 1.1 mm,大于二者在 X 方向的有效热源尺寸差距。

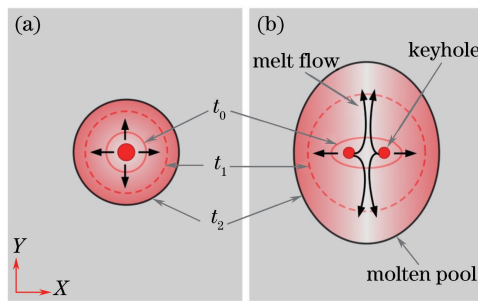


图 12 焊接初始阶段熔池形态演变机制示意图。(a) 单光束；(b) 双光束

Fig. 12 Schematic diagram of evolution mechanism of molten pool shape at the initial stage of welding.

(a) Single beam; (b) dual beam

图 13 为稳定焊接阶段熔池形成机制示意图。图 8~10 的试验结果表明,单、双光束焊接的熔池形态以及焊缝形貌具有明显差异。分析认为,在某一焊接速度下进行焊接时,两匙孔对熔池宽度方向熔体流动的增强作用仍然存在<sup>[14]</sup>。因此,与单光束相比,双光束焊接时熔体更多地向熔池宽度方向流动,因而更多的热量被传输到熔池宽度方向,导致更多的母材被熔化,进而熔池宽度增大,如图 8(b)所示。随着光斑间距的增大,匙孔对熔池宽度方向熔体流动的增强作用减弱,因此熔池宽度减小,如图 8(c)所示。熔体流动到熔池边界后会改变方向继续向熔池后部流动,因此双光束焊接过程中,热量会继续传输到熔池后部,导致熔池后部冷却速度下降,熔池长度大于单光束焊接的。随着光斑间距的增大,虽然匙孔对熔池流动的增强作用减弱,但是有效热源尺寸的增大会直接引起熔池后部热输入的增加,因此熔池长度反而增大。此外,从图 10(a)可知,在一定焊接速度下,双光束的焊缝熔深小于单光束的。分析认为,在双光束焊接过程中,光斑间距的存在

使得有效热源尺寸增大,同时导致了更多的热传导能量损耗<sup>[15]</sup>,能量利用率小于单光束焊接的,因此焊缝熔深变小;光斑间距越大,能量损耗越多,熔深也越小。

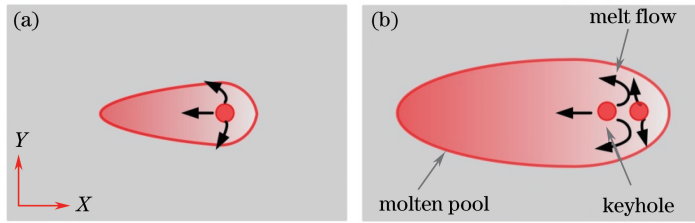


图 13 稳定焊接阶段的熔池形成机制示意图。(a) 单光束; (b) 双光束

Fig. 13 Schematic diagram of formation mechanism of molten pool at the stable stage of welding.

(a) Single beam; (b) dual beam

## 4 结 论

采用高速摄像系统实时观察单、双光束激光焊接不锈钢过程中的熔池形态,对比研究熔池行为和焊缝形貌,建立了二者之间的相关性,得到如下结论。

1) 在熔池形成阶段,单光束焊接熔池始终为圆形,而双光束焊接熔池形状出现椭圆-圆形-椭圆的演变过程;当光斑间距由 0.6 mm 增大到 0.9 mm 时,演变完成时间由 37.5 ms 左右增大到 130 ms;双光束焊接熔池尺寸始终大于单光束焊接的,且随光斑间距的增大,双光斑连线方向的熔池尺寸增大,而垂直于双光斑连线方向的熔池尺寸减小。

2) 在稳定焊接阶段,双光束焊接的熔池形态与单光束焊接的不同,且熔池尺寸大于单光束的;随光斑间距的增大,双光束焊接的熔池宽度减小、长度增大。双光束焊缝熔深均小于单光束的,熔宽均大于单光束的;随光斑间距的增大,双光束焊缝的熔深和熔宽均减小。

3) 双光束焊接过程中匙孔间的相互作用使得垂直于双光斑连线方向的熔体流动加强,光斑间距的增大会减弱匙孔间相互作用,这是导致单、双光束焊接熔池行为与焊缝形貌差异的主要原因。

## 参 考 文 献

- [1] Xie J. Dual beam laser welding[J]. *Welding Journal*, 2002, 81(9): 223-230.
- [2] Li Liqun, Chen Yanbin, Tao Wang. Research on dual-beam welding characteristics of aluminum alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(11): 1783-1788.  
李俐群, 陈彦宾, 陶 汪. 铝合金双光束焊接特性研究[J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1783-1788.
- [3] Chen S H, Zhai Z L, Huang J H, *et al.* Interface microstructure and fracture behavior of single/dual-beam laser welded steel-Al dissimilar joint produced with copper interlayer[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82(1): 631-643.
- [4] Lei Zhenglong, Li Ying, Chen Yanbin, *et al.* Effect of process parameters on porosity formation ratio in dual-beam laser welding of aluminum alloys with filler wire[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(2): 40-44.  
雷正龙, 李 颖, 陈彦宾, 等. 双光束激光填丝焊工艺对铝合金焊接气孔率的影响[J]. *焊接学报*, 2013, 34(2): 40-44.
- [5] Harooni M, Carlson B, Kovacevic R. Dual-beam laser welding of AZ31B magnesium alloy in zero-gap lap joint configuration[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56(5): 247-255.
- [6] Drezet J M, Lima M S F, Wagnière J D, *et al.* Crack-free aluminium alloy welds using a twin laser process[C]. *Proceedings of the International Institute of Welding Conference*, 2008: 87-94.
- [7] Shi Y, Zhang H, Watanabe T, *et al.* CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets[J]. *Optics and Laser Engineering*, 2010, 48(7): 732-736.
- [8] Yang Jing, Li Xiaoyan, Chen Li, *et al.* Microstructure and properties of twin spot laser welded joints of 1420 Al-Li alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(5): 871-874.  
杨 璟, 李晓延, 陈 俐, 等. 1420 铝锂合金双光点激光焊接接头组织性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(5):



871-874.

- [9] Haboudou A, Peyre P, Vannes A B, *et al.* Reduction of porosity content generated during Nd:YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 363(1-2): 40-52.
- [10] Shibata K, Iwase T, Sakamoto H, *et al.* Study on behavior in twin spot beam welding of aluminum alloys by means of X-ray observation[J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2003, 21(2): 204-212.
- [11] Shibata K, Iwase T, Sakamoto H, *et al.* Process stabilization by dual focus laser welding of aluminum alloys for car body[C]. *SPIE*, 2003, 5121: 376-384.
- [12] Hu J, Tsai H L. Fluid flow and weld pool dynamics in dual-beam laser keyhole welding[C]. *ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2003, 3: 151-159.
- [13] Zhou J, Tsai H L. Investigation of fluid flow and heat transfer in 3D dual-beam laser keyhole welding[C]. *ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 2010, 2: 247-254.
- [14] Fabbro R, Hamadou M, Coste F. Metallic vapor ejection effect on melt pool dynamics in deep penetration laser welding [J]. *Journal of Laser Applications*, 2004, 16(1): 16-19.
- [15] Xie J. Welding morphology and thermal modeling in dual-beam laser welding[J]. *Welding Journal*, 2002, 81: 283-290.