

# 光纤激光深熔焊接小孔形成过程的研究

赵乐<sup>1</sup>, 韩雪<sup>1</sup>, 邹江林<sup>1\*</sup>, 郑凯<sup>2</sup>, 肖荣诗<sup>1</sup>, 武强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京工业大学激光工程研究院高功率及超快激光先进制造实验室, 北京 100124;

<sup>2</sup>中国中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111

**摘要** 为研究小孔的形成过程,在光纤激光平板扫描焊接低碳钢中,采用调制激光出光时间的方式进行实验。结果表明:小孔的形成过程极为迅速,完整的形成时间在 ms 量级。低速焊接时,小孔的形成过程包括急速增加、缓慢增加和基本稳定不变三个阶段。高速焊接时,小孔的形成过程仅有急速增加过程。进一步实验结果表明:小孔的形成时间不超过激光焊接特征时间,且激光焊接特征时间随焊接速度的增加而减小,这是高速焊接时小孔仅有快速形成过程的原因。

**关键词** 光纤激光; 深熔焊接; 调制出光; 小孔; 熔深

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.071402

## Research on Formation Process of Keyhole During Fiber Laser Deep Penetration Welding

Zhao Le<sup>1</sup>, Han Xue<sup>1</sup>, Zou Jianglin<sup>1\*</sup>, Zheng Kai<sup>2</sup>, Xiao Rongshi<sup>1</sup>, Wu Qiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>High-Power and Ultrafast Laser Manufacturing Laboratory, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

<sup>2</sup>CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China

**Abstract** In order to study the formation process of keyhole, in the fiber laser plate scanning welding of low carbon steel, experiment was carried out by modulating laser light-out time. Experimental results show that the formation process of keyhole is extremely rapid, and the whole formation time of a keyhole is in ms level. In low-speed welding, the formation process of keyhole includes three stages: rapid increase, slow increase, and roughly stabilized stage. During high-speed welding, the formation process of keyhole only includes rapid formation stage. Further experiments show that the formation time of keyhole is not exceeding the characteristic time of laser welding and the characteristic time of laser welding decreases with the increase of welding speed, which together explain why keyhole formation only includes the rapid formation stage in high-speed welding.

**Key words** fiber laser; deep penetration welding; modulation light-out; keyhole; penetration depth

**OCIS codes** 140.3380; 160.3900; 120.3940; 140.3390

## 1 引言

激光深熔焊接具有焊接效率高、焊缝深宽比大、焊接质量好、加工柔性高等优势,是激光焊接领域中主要采用的焊接模式,在工业生产中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。但在深熔焊接过程中仍存在许多缺陷<sup>[3-6]</sup>,如焊缝凹陷、飞溅多、驼峰效应,制约了该技术的进

一步发展,这些缺陷与激光导致的熔化、蒸发、熔流和蒸气流等<sup>[7]</sup>因素引起的小孔特性行为密切相关。因此,研究小孔特性行为对理解激光深熔焊接缺陷的产生机理及优化激光深熔焊接工艺具有重要意义。

国内外学者已经采用了多种方法研究小孔的特性行为,包括同轴观测法<sup>[8]</sup>、“三明治”法<sup>[9]</sup>、X 射线

收稿日期: 2019-10-30; 修回日期: 2019-11-04; 录用日期: 2019-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(51875007)、北京市教委科技计划一般项目(KM201710005014)

\* E-mail: zoujianglin1@163.com

观测法<sup>[10]</sup>、焊接透明材料法<sup>[11]</sup>、数值模拟法<sup>[12]</sup>等。Semak 等<sup>[13]</sup>和 Katayama 等<sup>[10]</sup>在焊接不锈钢和铝合金时,用高速摄像机俯视观察了小孔的形成和塌陷时间,并对焊接过程中小孔和熔池的动态行为进行了研究。Luo 等<sup>[14]</sup>使用绿光作为照明光,基于同轴观测和灰度处理得到了小孔口和熔池的清晰图像。湖南大学 Zhang 等<sup>[15]</sup>运用 GG17 玻璃与低碳钢贴组成“三明治”模型用于焊接,可以从侧面观测到小孔的动态行为。Fujinaga 等<sup>[16]</sup>使用脉冲激光焊接不锈钢并利用 X 射线进行原位观察,探究了激光作用于材料 1 ms 内的小孔波动行为特征。Courtois 等<sup>[17]</sup>观察了熔池的演化行为,并对小孔塌陷和气孔的形成过程进行了分析。

深熔小孔的形成过程是研究小孔特性行为的重要方面,但现阶段对这方面探究较少。相比焊接速度、激光功率或离焦量等参数对小孔形成过程的影响规律,小孔形成时间与激光特征时间的关系、小孔快速形成过程中的特征报道较少。本文在光纤激光扫描焊接低碳钢中,采用调制出光时间的方式(扫描焊接过程中,固定相邻出光间隔时间,从 1 ms 开始以 1 ms 的幅度逐渐增加出光时间,出光时间内功率恒定)控制激光的输出能量,随后测量焊缝熔深随出光时间的变化规律,研究了光纤激光深熔焊接小孔的形成过程。

## 2 实验方法

实验采用的激光器为美国 IPG 公司生产的 YLS-6000 光纤激光器,其额定输出功率为 6 kW。光束经过芯径为 200  $\mu\text{m}$  的光纤进行传输,输出时经过的耦合准直镜焦距为 200 mm。采用焦长为 300 mm 的透镜聚焦,获得直径为 0.32 mm 的光斑,激光器的聚焦镜头装配到德国 KUKA 公司生产的机械手上。焊接实验中,激光束垂直于板材表面,板材保持静止,激光器随机械手移动。通过电脑程序控制激光器,出光模式采用调制出光时间模式,其原理如图 1(a)所示,实验装置示意图如图 1(b)所示。

图 1(a)中,相邻出光时间的间隔固定为 50 ms,设激光的出光时间为  $t$ 。采用平板扫描焊接方式,在同一次扫描焊接过程中,激光的出光时间  $t$  从 1 ms 开始以 1 ms 的幅度逐渐增加至 20 ms,出光时间  $t$  内激光的输出功率不变。实验材料为低碳钢(牌号为 Q235,化学成分:  $W_C = 0.12\%$ ,  $W_{Mn} = 0.33\%$ ,  $W_{Si} \leq 0.30\%$ ,  $W_S \leq 0.045\%$ ,  $W_P \leq 0.045\%$ ,  $W$  为质量分数,其余为铁,板材表面无涂层),尺寸

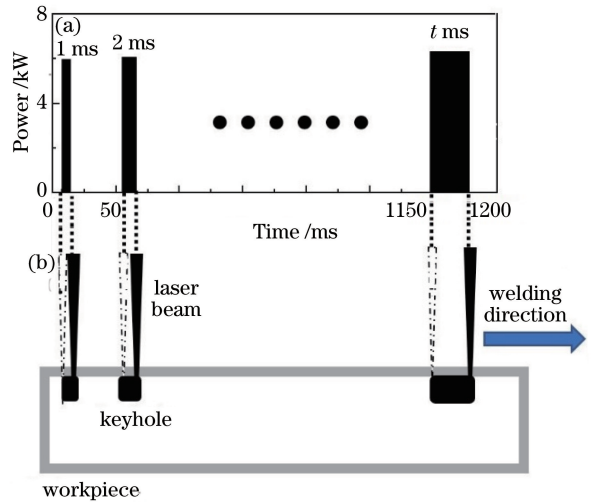


图 1 实验装置。(a)调制出光示意图;(b)平板扫描焊接示意图

Fig. 1 Experimental device. (a) Schematic diagram of modulation light-out; (b) schematic diagram of planar scanning welding

为 100 mm $\times$ 50 mm $\times$ 10 mm。焊接前采用磨削方法对低碳钢表面进行处理,并用丙酮擦拭除去表面杂质。

焊后沿焊缝的中心线进行切割,运用光学显微镜对焊缝截面进行拍摄,并测量焊缝深度或小孔深度。当热输入量较小时,基于熔池快速冷却可保留深熔小孔;当热输入量较大时,则不能保留深熔小孔。由于孔深与熔深具有对应关系,为了单独研究孔深随出光时间的变化规律,可将焊缝中没有小孔时,熔深随出光时间的变化等效为孔深随出光时间的变化。

## 3 实验结果

### 3.1 调制激光出光时间焊接的典型焊缝形貌

设激光功率  $P = 6 \text{ kW}$ 、焊接速度  $v = 2 \text{ m/min}$ 、离焦量  $\Delta f = 0 \text{ mm}$ ,扫描焊接中  $t$  从 1 ms 开始,以 1 ms 的幅度递增至 20 ms 时,获得的典型焊缝形貌变化如图 2 所示,其中焊接方向为图中箭头标注方向。图 2(a)~图 2(t),分别为出光时间在 1~20 ms 时对应的焊缝形貌。可以看出,当  $t < 10 \text{ ms}$  时,随出光时间的增加,小孔口/熔宽横向纵向均有增大的趋势。当  $t$  从 11 ms 逐渐增加到 20 ms 时,随  $t$  的增加,小孔口/熔宽垂直焊接方向的直径基本不变。

对图 2 中的焊缝进行测量(测量小孔口/熔宽最宽位置),得到小孔口/熔宽随出光时间的变化规律,如图 3 所示。可以看出,当  $t < 6 \text{ ms}$  时,随着出光时

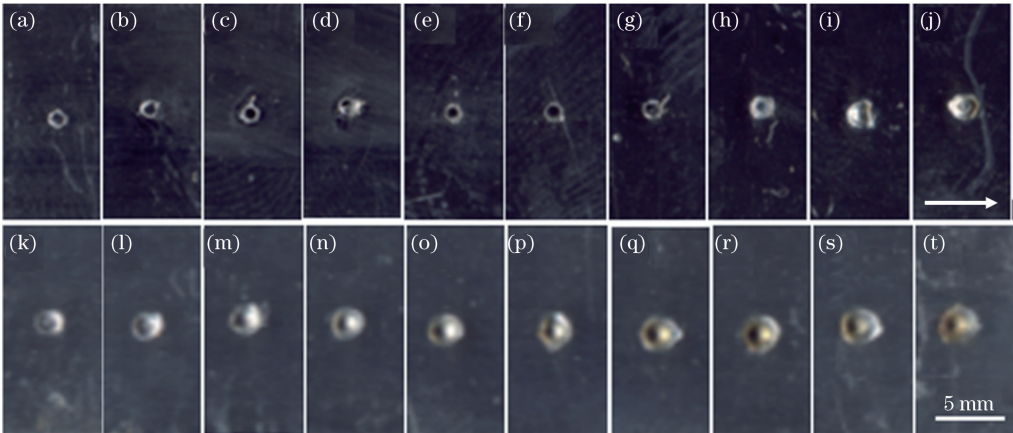


图 2 1~20 ms 内出光孔口变化图

Fig. 2 Change chart of output orifice during 1-20 ms

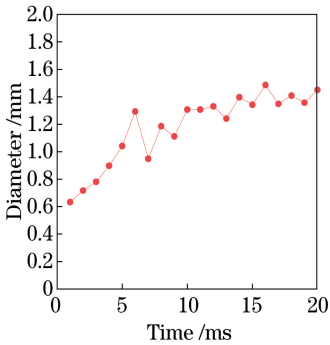


图 3 1~20 ms 内出光孔口变化曲线图

Fig. 3 Change curve of output orifice during 1-20 ms

间的增加,小孔口/熔宽迅速增加。当  $t$  从 6 ms 逐渐增加到 10 ms 时,小孔口/熔宽缓慢增加,且存在较大波动。出光时间从 10 ms 逐渐增加到 20 ms

时,小孔口/熔宽基本不变,略有波动。

将图 2 中的焊缝沿中心线切开并抛光、腐蚀,测得其形貌如图 4 所示,图 4(a)~图 4(t) 分别为出光时间在 1~20 ms 时对应的焊缝截面形貌。可以发现  $t < 6$  ms 时,小孔孔深/熔深随着时间的增加而迅速增大。当出光时间在 6~10 ms 之间时,小孔孔深/熔深为缓慢增加的过程。而当  $t > 10$  ms 时,小孔孔深/熔深基本保持不变,这与小孔口直径的变化规律基本一致。此外,通过小孔的截面图可以清晰看出,当出光时间在 0~5 ms 之间时,熔池冷冻保留的小孔呈现为完全张开、无明显的闭合现象。而当出光时间超过 6 ms 时,小孔孔深/熔池开始产生闭合现象。在测量中,当小孔已经凝固形成焊缝时,将熔深等效为孔深。

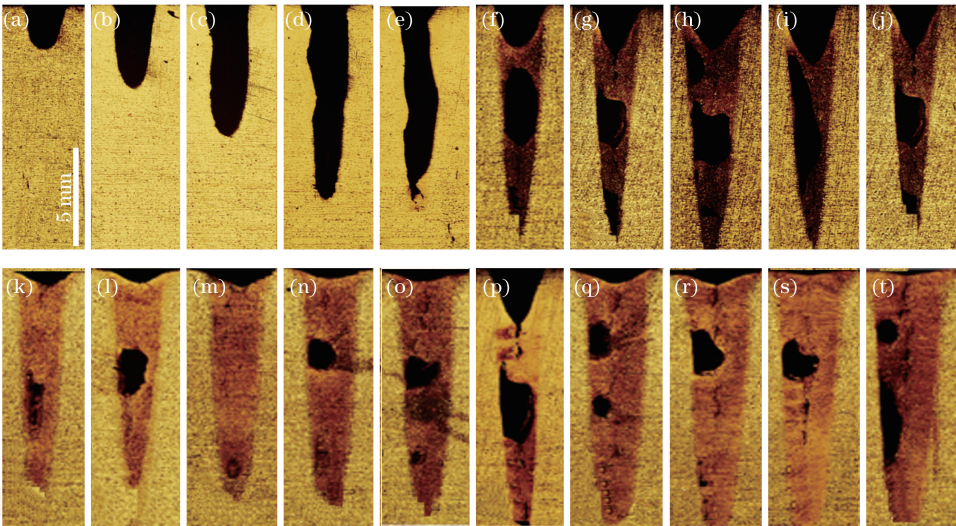


图 4 出光时间对小孔孔深/熔深的影响

Fig. 4 Effect of light-out time on pore/depth

### 3.2 焊接工艺参数对孔深/熔深随出光时间变化规律的影响

图5为 $v=2\text{ m/min}$ ,  $\Delta f=0\text{ mm}$ 时,不同激光功率下孔深/熔深随激光出光时间的变化规律。可见,随着激光功率的增加,相同出光时间内孔深/熔深有明显的增加,且孔深/熔深随激光出光时间的变化规律基本一致。当 $0\text{ ms}<t<5\text{ ms}$ 时,孔深/熔深均为急速增加的现象,且激光功率越高,增加的速度越快。当 $5\text{ ms}<t<10\text{ ms}$ 时,孔深/熔深均为缓慢增加的过程。而当 $t>10\text{ ms}$ 时,不同功率下孔深/熔深基本同时达到稳定值,此时随着激光出光时间的增加,熔深基本保持不变,但会存在一定的波动,尤其在 $6\text{ kW}$ 等高功率下波动较为明显。

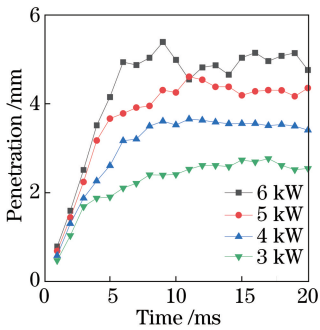


图5 不同激光功率下孔深/熔深随出光时间的变化规律  
Fig. 5 Variation of hole depth/penetration with light-out time under different laser powers

当 $P=6\text{ kW}$ ,  $\Delta f=0\text{ mm}$ 时,焊接速度对孔深/熔深随出光时间变化规律的影响如图6所示。可以发现,固定激光功率后,随着焊接速度的增加,小孔稳定后的孔深/熔深变得更浅。当 $t<6\text{ ms}$ 时,小孔的孔深均经历急速增加的过程,且增加的速度(图中折线的斜率)大致相当,即该阶段孔深增加的速度与焊接速度无关。当 $v=1\text{ m/min}$ 时,小孔的孔深/熔深经历快速增加、缓慢增加和不再继续增加三个阶段;当 $t>10\text{ ms}$ 时,小孔的深度基本达到稳定值。而当 $v=4\text{ m/min}$ 时,小孔的形成过程仅有快速增加过程,即该焊接速度下,当 $t>5\text{ ms}$ 时,孔深/熔深不再继续增加。由此可见,深熔小孔经历三个阶段的时间长短与焊接速度近似呈负相关关系。

图7为 $P=6\text{ kW}$ ,  $v=2\text{ m/min}$ 时,不同离焦量下孔深/熔深随激光出光时间的变化规律。可以看出,当离焦量 $d$ 分别为 $5$ 、 $0$ 、 $-5\text{ mm}$ ,出光时间在 $0\sim 5\text{ ms}$ 之间时,孔深/熔深均经历了急速增加过程,而零离焦和负离焦孔深/熔深增加的速度相对正离焦更大(图中折线的斜率更大)。而当出光时间分

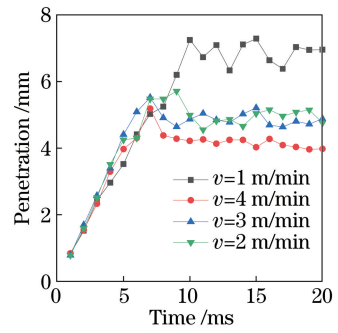


图6 不同速度下孔深/熔深随出光时间的变化关系  
Fig. 6 Variation of hole depth/penetration with light-out time at different velocities

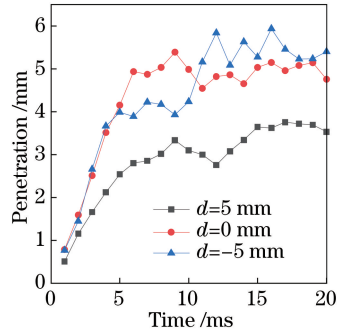


图7 不同离焦量下孔深/熔深随出光时间的变化关系  
Fig. 7 Variation of hole depth/penetration with light-out time under different defocusing amounts

别在 $5\sim 16\text{ ms}$ 、 $5\sim 10\text{ ms}$ 、 $5\sim 17\text{ ms}$ 时,孔深/熔深均经历了缓慢增加的过程。当出光时间分别超过 $16$ 、 $10$ 、 $17\text{ ms}$ 时,小孔深度/熔深基本均达到稳定值。离焦量为 $-5\text{ mm}$ 时,形成的稳定孔深/熔深最深, $0\text{ mm}$ 离焦量时次之,而 $5\text{ mm}$ 离焦量时形成的熔深最浅。 $0\text{ mm}$ 离焦时小孔波动最小,即焊接过程相对最稳定。

### 3.3 常规激光焊接的典型焊缝形貌

基于调制激光出光时间焊接获得的结果表明:小孔的形成过程极为迅速,在 $\text{ms}$ 量级。为验证常规激光焊接中小孔的形成过程也具有该规律,在 $P=6\text{ kW}$ ,  $t=2000\text{ ms}$ ,  $v=2\text{ m/min}$ ,  $\Delta f=0\text{ mm}$ 时进行了实验,激光器在机械手扫描过程中出光,焊接低碳钢获得的典型长焊缝表面形貌如图8所示。可以清晰看出焊缝部分及焊缝热影响区部分,还可以看出焊缝表面存在许多飞溅以及焊缝收尾处的塌陷部分。

图9为焊缝沿焊缝中心线切割,在 $t$ 时间段初期(最初 $90\text{ ms}$ 内)的焊缝纵向截面形貌。可以看出,激光出光后,焊缝熔深的增加特别陡峭(图9左侧部分),表明光纤激光焊接熔深的形成过程极为迅



图 8 平板扫描焊接低碳钢焊缝表面

Fig. 8 Surface of low carbon steel weld by plate scanning welding

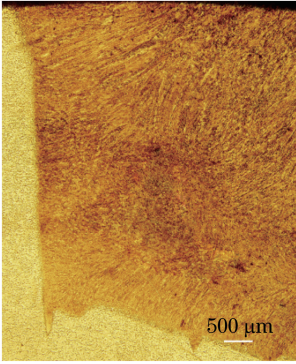


图 9 焊缝起始位置的纵向截面

Fig. 9 Metallogram of longitudinal cutting at the initial position of weld

速,与采用调制激光出光时间获得的结果一致。在小孔急速形成后,焊接熔深则基本保持不变。形成稳定熔深后,焊缝底部仍存在一定的波动,表明形成稳定焊接后,小孔依然是波动的。这证明了焊接初期,深熔焊接的形成过程与采用调制激光出光时间获得的结果一致。

## 4 分析与讨论

高功率光纤激光焊接中,激光束直接作用于小孔前壁,小孔的深度主要取决于小孔前壁对入射激光的一次吸收<sup>[18]</sup>。取小孔前壁表面上任意一点为研究对象,设该点被激光照射的时间为光斑直径( $l$ )与焊接速度( $v$ )的比值( $l/v$ ),即该点在激光致蒸发反冲压力作用下,沿孔壁向下运动的时间为激光焊接特征时间<sup>[13]</sup>。该点的运动过程即为小孔的形成过程,表明激光深熔焊接小孔的形成过程与激光焊接特征时间有关。

图 10 为光纤激光平板扫描板焊接低碳钢时,不同焊接速度下激光焊接特征时间与实验测得形成稳定小孔所需时间的对比关系。可见不同焊接速度下,光纤激光焊接低碳钢形成稳定小孔所需时间与激光焊接特征时间基本一致。由于激光刚开始作用于板材表面时存在对板材的预热作用,迅速达到沸点会使蒸发反冲压力克服表面张力,导致激光作用区域下陷形成深熔小孔,这一过程大约需要  $0.6 \text{ ms}$ <sup>[13]</sup>,所以实验测量得到的激光焊接特征时间略大于理论计算值。当  $v=1 \text{ m/min}$  时,由于低速

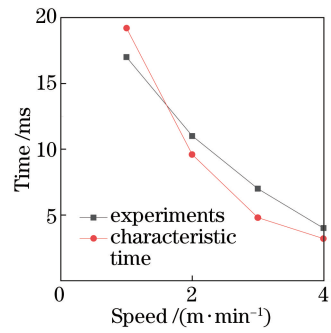


图 10 不同速度形成稳定熔深时间与特征作用时间

Fig. 10 Stable penetration formation time and characteristic action time at different velocities

焊接特征时间较长(实验条件为  $20 \text{ ms}$ ),形成小孔所需时间小于焊接特征时间,因此,当焊接速度降低到一定值后,熔深将不再增加。

图 11 为  $v=2 \text{ m/min}$  时,不同激光功率下焊接特征时间与实验测量获得形成稳定小孔所需时间的关系图。可以看出,不同激光功率焊接低碳钢时,形成稳定熔深所需时间与焊接特征时间基本一致。同理,根据光束的传输关系,当离焦量为  $\pm 5 \text{ mm}$  时,利用实验参数计算获得焊接特征时间约为  $19.6 \text{ ms}$ ,图 7 中实验测得离焦量为  $\pm 5 \text{ mm}$  时形成完整深熔小孔所需时间约为  $18 \text{ ms}$ 。即当离焦量不为  $0$  时,由于光斑直径增加导致焊接特征时间相对增大,焊接中形成完整小孔所需时间也小于焊接特征时间。

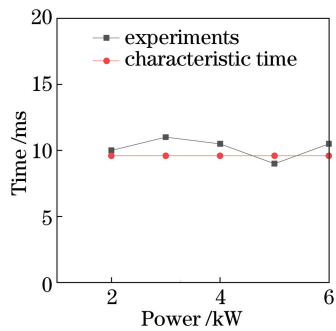


图 11 不同功率形成稳定熔深时间与特征作用时间

Fig. 11 Stable penetration formation time and characteristic action time for different powers

从给予光纤激光电信号到光纤激光出光,其时间间隔在数十  $\mu\text{s}$  量级,因激光的调制时间在  $\text{ms}$  量级,故而可忽略光纤激光响应时间引入的误差。由图 4~图 7,可发现小孔的快速形成阶段均约为  $5 \text{ ms}$ ,一方面表明小孔的形成几乎不受激光功率、焊接速度和离焦量等参数的影响;另一方面也证明了调制激光所需的相应时间可忽略。小孔的快速形成阶段对应的是小孔的形成初期,该阶段小孔的孔

深较浅,作用于小孔孔壁上激光束的离焦量较小。此时,激光束的能量最为集中,孔壁上激光导致的金属蒸发也最为剧烈(激光致蒸发反冲压力最强)。因此,高功率光纤激光焊接小孔在其形成初期的速度最为迅速,该阶段与激光的光束质量、聚焦系统等因素有关,其形成时间几乎不受激光功率、焊接速度和离焦量的影响。

当焊接速度较大时,焊接特征时间可等于、甚至小于小孔快速形成阶段的最大时间(实验条件约为5 ms),这也是当焊接速度较高时,小孔的形成过程仅有快速形成阶段的原因(焊接特征时间小于或等于5 ms时,小孔的形成时间等于焊接特征时间)。当焊接速度较低时,激光深熔焊接小孔形成过程则包括快速形成、缓慢加深和基本稳定不变三个阶段。缓慢加深过程主要是由于小孔形成的中后期,随着小孔的加深,激光离焦量变大,激光能量密度减小,使得蒸发反冲压力减小。这是低速或大离焦焊接中,小孔形成时间小于焊接特征时间的原因。小孔基本稳定过程主要是由于小孔形成后,小孔底部激光致蒸发反冲压力与材料表面张力基本相当造成的。

## 5 结 论

采用调制激光出光时间的方式,在光纤激光扫描焊接低碳钢中,观察了不同工艺参数下熔深随激光出光时间的变化规律,获得了如下结论:

1) 光纤激光深熔焊接小孔的形成过程极为迅速,其形成时间不超过激光焊接特征时间,在ms量级;

2) 低速焊接时,小孔的形成过程包括快速形成、缓慢形成和基本维持不变这三个阶段,其形成时间小于激光焊接特征时间;高速焊接时,小孔的形成过程仅有快速形成阶段,其形成时间等于激光焊接特征时间。

3) 小孔的快速形成过程和时间基本不受激光功率、焊接速度和离焦量等参数影响,激光焊接特征时间随焊接速度增加而减小,是高速焊接时深熔小孔仅有快速形成阶段的原因。

## 参 考 文 献

[1] Li M, Zhang W, Hua X M, et al. Investigation of plasma and metal transfer dynamic behavior during fiber laser GMAW-P hybrid welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402008.

李敏, 张旺, 华学明, 等. 光纤激光与 GMAW-P 复合焊接等离子体及熔滴过渡动态特征研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402008.

[2] Ren Y, Wu Q, Zou J L, et al. Real-time monitoring of coaxial protection fiber laser welding of austenitic stainless steels [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0502003.

任勇, 武强, 邹江林, 等. 奥氏体不锈钢光纤激光同轴保护焊接的实时监测 [J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0502003.

[3] Xin J J, Fang C, Song Y T, et al. Autogenous laser welding of 20-mm-thick 316LN stainless steel plate by ultra high power fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0502007.

信纪军, 方超, 宋云涛, 等. 20 mm 厚 316LN 不锈钢板的超高功率光纤激光自熔焊 [J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0502007.

[4] Wang J, Wang C M, Meng X X, et al. Study on the periodic oscillation of plasma/vapour induced during high power fibre laser penetration welding [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 67-70.

[5] Gao M, Chen C, Hu M, et al. Characteristics of plasma plume in fiber laser welding of aluminum alloy [J]. Applied Surface Science, 2015, 326: 181-186.

[6] Zhao L, Tsukamoto S, Arakane G, et al. Influence of welding parameters on weld depth and porosity in high power fiber laser welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11): 1103004.

赵琳, 塚本进, 荒金吾郎, 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.

[7] Zou J L, Yang W X, Wu S K, et al. Effect of plume on weld penetration during high-power fiber laser welding [J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022003.

[8] Martin B, Loredó A, Pilloz M, et al. Characterisation of CW Nd: YAG laser keyhole dynamics [J]. Optics & Laser Technology, 2001, 33(4): 201-207.

[9] Jin X Z, Zeng L C, Cheng Y Y. Direct observation of keyhole plasma characteristics in deep penetration laser welding of aluminum alloy 6016 [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(24): 245205.

[10] Katayama S, Kawahito Y, Mizutani M. Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects [J]. Physics Procedia, 2010, 5: 9-17.

[11] Semak V V, Bragg W D, Damkroger B, et al.

- Transient model for the keyhole during laser welding [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1999, 32(15): L61-L64.
- [12] Wang H Z, Zou Y. Microscale interaction between laser and metal powder in powder-bed additive manufacturing: conduction mode versus keyhole mode [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 142: 118473.
- [13] Semak V V, Steele R J, Fuerschbach P W, et al. Role of beam absorption in plasma during laser welding [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000, 33(10): 1179-1185.
- [14] Luo M, Shin Y C. Vision-based weld pool boundary extraction and width measurement during keyhole fiber laser welding [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 64: 59-70.
- [15] Zhang Y, Chen G Y, Wei H Y, et al. A novel “sandwich” method for observation of the keyhole in deep penetration laser welding [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(2): 133-139.
- [16] Fujinaga S, Takenaka H, Narikiyo T, et al. Direct observation of keyhole behaviour during pulse modulated high-power Nd : YAG laser irradiation [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000, 33(5): 492-497.
- [17] Courtois M, Carin M, Masson P L, et al. A new approach to compute multi-reflections of laser beam in a keyhole for heat transfer and fluid flow modelling in laser welding [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(50): 505305.
- [18] Kaplan A F H, Matti R S. Absorption peaks depending on topology of the keyhole front and wavelength [J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(S2): S29012.