

# 激光热丝焊接过程焊丝过渡行为及其稳定性的研究

郑世卿<sup>1</sup> 温 鹏<sup>1,2</sup> 单际国<sup>1,2</sup>

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

**摘要** 激光热丝焊热输入小, 填丝效率高, 焊缝熔合比小, 特别适合于表面堆焊及厚板的窄间隙焊接, 如何获得稳定的焊丝过渡是其关键问题。采用高速摄像观察了不同工艺参数下的焊丝过渡行为, 将其分为滴状过渡、熔断过渡、连续过渡、顶丝过渡 4 种类型, 连续过渡是稳定的焊丝过渡, 是获得良好焊缝成形的前提。不同焊丝过渡行为的区别表现为焊丝熔化位置不同, 这是由焊丝获得热量的大小不同所导致的。获得稳定焊丝过渡的工艺控制原则是: 电阻热小于焊丝熔化热, 且电阻热与熔池传热之和大于焊丝熔化热。通过理论推导对熔池外焊丝温度进行了计算, 发现当电阻热将熔池外焊丝加热至接近熔点时, 有利于获得稳定的焊丝过渡。

**关键词** 激光技术; 激光热丝焊; 焊缝成形; 焊丝过渡稳定性; 电阻热; 熔池传热

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0403008

## Research on Wire Transfer and Its Stability in Laser Hot Wire Welding Process

Zheng Shiqing<sup>1</sup> Wen Peng<sup>1,2</sup> Shan Jiguo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

<sup>2</sup> Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing, 100084 China

**Abstract** With advantages of low heat input, high feeding efficiency and low penetration ratio, laser hot wire welding is fit for surfacing and joining thick plate. How to obtain the stable wire transfer is the key problem for laser hot wire welding. High speed imaging is used to observe wire transfer behavior under different welding parameters, which are divided into four kinds: drop transfer, fusing transfer, continuous transfer and wire hit transfer. The continuous transfer is the stable wire transfer and it is the assurance of good weld formation. The differences among the four wire transfer kinds show that the different wire fusion positions are decided by the wire heat. Therefore, the control principles to obtain the stable wire transfer are that wire fusion heat is larger than the resistance heat, and smaller than the total of the resistance heat and the conduct heat from the molten pool to the wire. The temperature of the wire outside the molten pool is calculated. It is found that it is beneficial to obtain the stable wire transfer when the wire temperature is close to the wire fusion point.

**Key words** laser technique; laser hot wire welding; weld formation; stability of wire transfer; resistance heat; conduct heat

**OCIS codes** 140.3390; 000.3860; 000.6850

## 1 引 言

激光焊热输入小且能够精确控制, 是一种先进的焊接方法。目前激光焊多为不填充焊丝的自熔性

焊接, 存在搭桥能力差、无法调整焊缝化学成分、难以焊接厚板等不足, 而激光填丝焊是解决以上问题的有效方法<sup>[1-4]</sup>。激光热丝焊采用激光和电阻热两

收稿日期: 2013-09-05; 收到修改稿日期: 2013-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(51005125)、国家“973”计划(2011CB013404)

作者简介: 郑世卿(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: tangss2@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)

个热源相对独立地加热母材和焊丝,与普通激光填丝焊相比,激光热丝焊具有激光能量利用率高<sup>[5-6]</sup>、填丝效率高<sup>[7-8]</sup>、焊缝熔合比小等优势,是一种非常有发展前景的新的激光填丝焊技术,目前已用于表面堆焊<sup>[7-9]</sup>和窄间隙焊接<sup>[10-11]</sup>等场合。

激光热丝焊的焊丝经过电流加热后送入熔池,如何获得稳定的焊丝过渡是该方法的关键问题。文献[12]研究了铝合金激光冷丝焊,发现焊丝过渡行为是影响焊缝成形的本质因素,并对其进行了系统研究。对于激光热丝焊,电阻热源的引入使得焊丝过渡行为更加复杂。文献[13-15]针对激光热丝焊工艺参数对焊缝成形质量的影响规律进行了实验研究,提出稳定的焊丝过渡是获得良好焊缝成形的重要前提。目前尚未发现针对激光热丝焊过程中焊丝过渡行为的系统研究,对于焊丝过渡稳定性影响机理的研究尚未见报道。通过工艺实验,建立工艺参数-焊丝热量-焊丝过渡稳定性-焊缝成形四者之间的联系,重点关注焊丝过渡行为对焊缝成形的影响、焊丝过渡行为的分类以及获得稳定焊丝过渡的条件,为激光热丝焊接过程及焊接质量的控制建立基础。

## 2 实验材料与方法

母材为低碳钢,板厚为 3 mm;焊丝为 308L 奥氏体不锈钢,液相线温度为 1464 ℃,直径为 1.2 mm。激光热丝焊接系统如图 1 所示。当激光功率不超过 2000 W 时,均采用 IPG YLS-2000 激光器作为光源;为了考察更高的激光功率对焊丝过渡稳定性是否产生实质性影响,还采用 Trumpf HL4406D 激光器在 4000 W 功率下进行了实验研究。采用 Panasonic YC-400 TX 热丝电源对焊丝进

行电阻加热,热丝电源为恒流模式,电源正极接在焊丝上,负极接在工件上。采用 Photron SA3 高速相机拍摄焊接过程中的焊丝过渡行为,主动照明光源为功率 8.8 W、波长 810 nm 的激光。

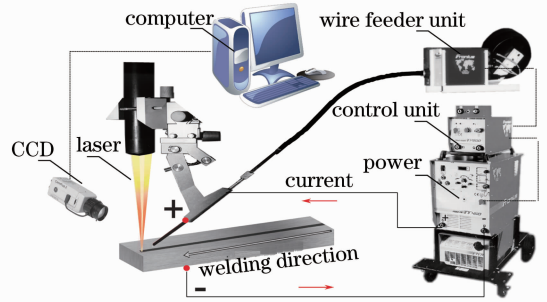


图 1 激光热丝焊接系统

Fig. 1 Laser hot wire welding system

实验采用单一变量原则,分别改变加热电流、送丝速度、光丝距和激光功率 4 个参数,研究它们对平板堆焊焊缝成形和焊丝过渡行为的影响,焊接速度为 0.5 m/min 和光斑直径为 3 mm,保持不变。实验采用的工艺参数如表 1 所示。母材熔化宽度为 3~3.5 mm,送丝速度范围由母材熔化宽度和堆高相对值决定。当送丝速度大于 3 m/min 时,焊缝堆高过大,焊缝两侧的熔敷金属与母材之间产生未熔合;送丝过慢,则失去了激光热丝焊焊丝填充效率高的优势,故送丝速度的选择范围是 1~3 m/min。在焊接开始前的初始状态下,焊丝末端与工件表面接触时,将焊丝从导电嘴夹持端到工件表面的距离定义为干伸长,其值为 35 mm;将焊丝与工件表面之间的夹角定义为送丝角度,其值为 70°;将工件表面上激光光斑中心到焊丝中心的距离定义为光丝距。在焊接方向上,焊丝位于光斑之后时,光丝距为正值;反之,光丝距为负值。

表 1 工艺参数的变化范围

Table 1 Adjustment range of welding parameters

Welding parameters		Heating current /A	Wire feeding rate /( $m \cdot min^{-1}$ )	Distance between wire and laser /mm	Laser power /kW
Heating current /A	40,90,120	—	2	1	2
Wire feeding rate /( $m \cdot min^{-1}$ )	1,2,3	90	—	1	2
Distance between wire and laser /mm	-2,0,1,2	90	2	—	2
Laser power /kW	1,2,4	90	2	1	—

采用与平板堆焊相同的工艺参数在窄间隙坡口内进行焊接实验,考察了加热电流对窄间隙焊接时

焊缝成形和焊丝过渡行为的影响规律,窄间隙坡口深为 8 mm,宽为 3 mm。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 工艺参数对平板堆焊焊缝成形和焊丝过渡行为的影响

##### 3.1.1 加热电流

如图 2 所示,当加热电流为 120 A 时,焊接过程



图 2 加热电流对焊缝成形的影响。(a) 120 A, 熔断过渡; (b) 90 A, 连续过渡; (c) 40 A, 顶丝过渡

Fig. 2 Influence of heating current on weld formation. (a) 120 A, fusing transfer; (b) 90 A, continuous transfer; (c) 40 A, wire hit transfer

##### 3.1.2 送丝速度

如图 3 所示,当送丝速度为 1 m/min 时,熔池外的焊丝不断发生熔断,焊缝连续性差。送丝速度



图 3 送丝速度对焊缝成形的影响。(a) 1 m/min, 熔断过渡; (b) 2 m/min, 连续过渡; (c) 3 m/min, 顶丝过渡

Fig. 3 Influence of wire feeding rate on weld formation. (a) 1 m/min, fusing transfer; (b) 2 m/min, continuous transfer; (c) 3 m/min, wire hit transfer

##### 3.1.3 光丝距

如图 4 所示,当光丝距为 -2 mm 时,激光直接照射在焊丝上使之熔化,熔滴向下滴落形成熔池,焊缝是一个个不连续的熔滴。当光丝距为 0 mm 时,激光仍然能够照射焊丝,熔池外的焊丝不断发生熔



图 4 光丝距对焊缝成形的影响。(a) -2 mm, 滴状过渡; (b) 0 mm, 熔断过渡; (c) 1 mm, 连续过渡

Fig. 4 Influence of distance between wire and laser on weld formation. (a) -2 mm, drop transfer; (b) 0 mm, fusing transfer; (c) 1 mm, continuous transfer

##### 3.1.4 激光功率

如图 5 所示,激光功率为 4 kW 和 2 kW 时,焊丝



图 5 激光功率对焊缝成形的影响。(a) 4 kW, 连续过渡; (b) 2 kW, 连续过渡; (c) 1.5 kW, 顶丝过渡

Fig. 5 Influence of laser power on weld formation. (a) 4 kW, continuous transfer; (b) 2 kW, continuous transfer; (c) 1.5 kW, wire hit transfer

工艺参数变化对焊缝成形质量影响较大。加热电流较大、送丝速度较小以及激光直接照射焊丝时,容易导致焊丝在进入熔池之前就发生熔断现象,有飞溅产生,焊缝连续性差。加热电流较小、送丝速度较大以及激光功率较小时,易出现顶丝现象,焊缝有驼峰产生。只有加热电流和送丝速度合适,焊丝送入熔池而不被激光照射,且激光功率足够高时,焊丝才能稳定地送入熔池,获得良好的焊缝成形。当激光功率为 2 kW,光丝距为 1 mm,加热电流为 90 A,

中熔池外的焊丝受热不断发生熔化爆断,焊缝填丝量不均匀,焊缝边缘有夹丝,焊缝宽度和高度不均匀,成形较差。当加热电流降低到 90 A 时,焊丝能够持续稳定地过渡到熔池中,焊缝成形良好。当加热电流降低到 40 A 时,出现顶丝现象,焊缝有驼峰产生。

升高到 2 m/min 时,焊丝稳定地过渡到熔池中,焊缝成形良好。送丝速度升高到 3 m/min 时,出现顶丝,焊缝高度和宽度的均匀性变差。

断,焊缝连续性差。光丝距增加到 1 mm 时,焊丝稳定地过渡到熔池中,焊缝成形良好。光丝距继续增加到 3 mm 以上时,焊丝送入熔池尾部,焊丝尚未发生熔化就随着熔池快速凝固,发生强烈的顶丝现象,焊接过程中断。

稳定地过渡到熔池中,焊缝成形良好。激光功率降低至 1.5 kW 时,出现顶丝现象,焊缝有驼峰产生。

送丝速度为 2 m/min 时,焊丝稳定地过渡到熔池中,焊缝成形最佳。工艺参数是通过影响焊丝过渡行为来影响焊缝成形的。

#### 3.2 平板堆焊典型焊丝过渡行为

通过观察平板堆焊激光热丝焊焊接过程,发现存在 4 种典型的焊丝过渡行为,如图 6 所示。

1) 滴状过渡:如图 6(a)所示,工艺参数为激光功率 2 kW,光丝距 -2 mm,加热电流 90 A,送丝速度 2 m/min。激光照射在焊丝上使之熔化[图 6

(a1)],熔滴附着在焊丝前端不断长大[图 6(a2)],最后在重力作用下滴落进入熔池[图 6(a3)]。光丝距过小时会导致滴状过渡,在这种过渡行为下,焊缝不连续,如图 4(a)所示。由于焊丝始终与熔池不接触,无法构成电流回路,焊丝未受到电阻加热,此种情况已不属于激光热丝焊范畴。

2) 熔断过渡:如图 6(b)所示,工艺参数为激光功率 2 kW,光丝距 1 mm,加热电流 120 A,送丝速度 2 m/min。固体焊丝接触熔池形成电流回路,开始对焊丝进行电阻加热[图 6(b1)];随着热量的积累,熔池外部的焊丝被加热至熔断,焊丝与熔池脱离接触,失去电阻加热效果[图 6(b2)];冷却后的焊丝被重新送入熔池,焊丝与熔池再次发生接触,电阻加热恢复[图 6(b3)],如此循环。加热电流过大、送丝速度过小或者光丝距较小时会导致熔断过渡,在这种过渡行为下,焊缝存在飞溅和夹丝,连续性差,如图 2(a)、图 3(a)和图 4(b)所示。

3) 连续过渡:如图 6(c)所示,工艺参数为激光功率 2 kW,光丝距 1 mm,加热电流 90 A,送丝速度 2 m/min。焊丝连续送入熔池,并在熔池内迅速熔化,送丝流畅稳定。加热电流、送丝速度、光丝距和激光功率合适时会导致连续过渡,在这种过渡行为下,焊缝成形良好,如图 2(b)、图 3(b)、图 4(c)、图 5(a)和图 5(b)所示。

4) 顶丝过渡:如图 6(d)所示,工艺参数为激光功率 2 kW,光丝距 1 mm,加热电流 40 A,送丝速度 2 m/min。焊丝送入熔池中部[图 6(d1)],但在熔池内不能及时熔化,焊丝前端与熔池壁顶触,焊丝在顶丝力的作用下向熔池前方滑动[图 6(d2)],在积累一定热量后焊丝前端熔化,顶丝力消失,焊丝重新回到初始位置[图 6(d3)],如此循环。加热电流过小、送丝速度过大、光丝距过大或者激光功率过小时会导致顶丝过渡,在这种过渡行为下,易导致驼峰的产生,焊缝成形较差,如图 2(c)、图 3(c)以及图 5(c)所示。

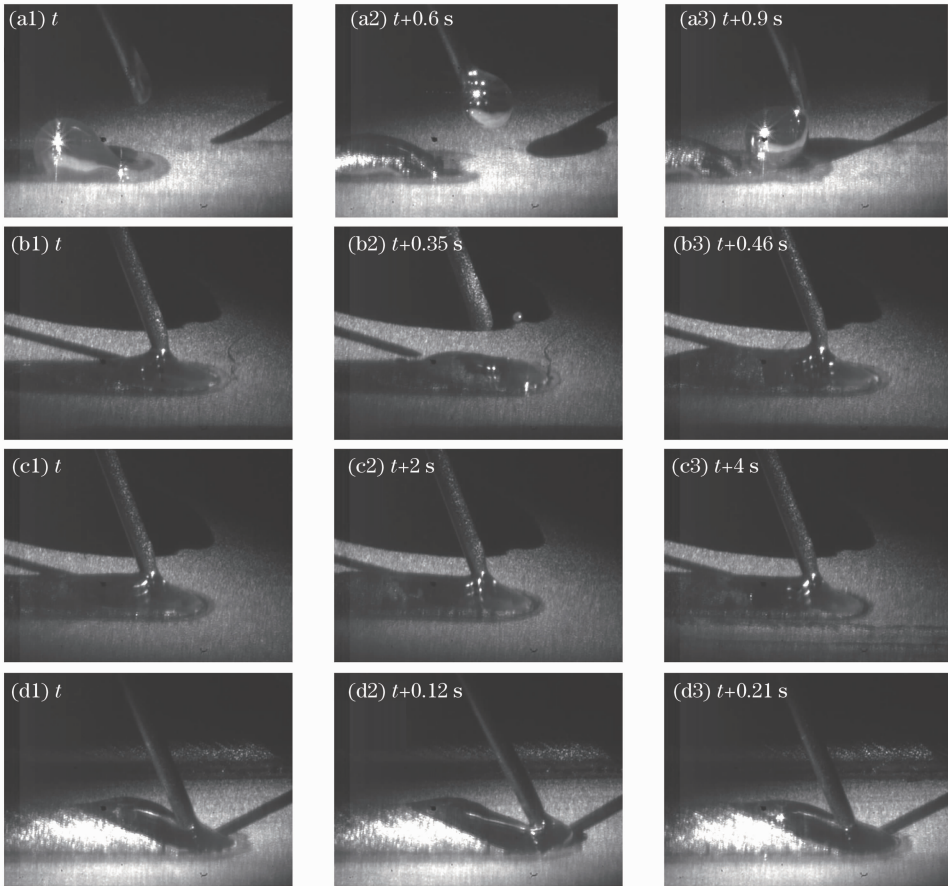


图 6 平板堆焊焊丝过渡行为。(a1)~(a3) 滴状过渡; (b1)~(b3) 熔断过渡; (c1)~(c3) 连续过渡; (d1)~(d3) 顶丝过渡

Fig. 6 Wire transfer behavior of bead on the plate. (a1)~(a3) Drop transfer; (b1)~(b3) fusing transfer; (c1)~(c3) continuous transfer; (d1)~(d3) wire hit transfer

由对焊丝过渡行为的分析可知,连续过渡是获得良好焊缝形成的基础。填丝焊要保证良好的焊缝成

形必须保持焊接过程中焊缝的填丝量不变,基于此提出焊丝过渡稳定性的定义:任意相等时间段内过渡进



入熔池并熔化成为焊缝金属的焊丝质量保持恒定。滴状过渡、熔断过渡和顶丝过渡属于不稳定的焊丝过渡行为,只有连续过渡是稳定的焊丝过渡行为。稳定的焊丝过渡是获得良好焊缝成型的基础。

### 3.3 加热电流对窄间隙焊接焊缝成形和焊丝过渡行为的影响

随着加热电流的减小,窄间隙激光热丝焊焊缝

成形如图 7 所示,此时激光功率为 2 kW,光丝距为 1 mm,送丝速度为 2 m/min。将相同工艺参数下窄间隙焊缝成形与平板堆焊焊缝成形(图 2)进行比较发现,当加热电流为 120 A 时,焊接过程均有飞溅产生,焊缝连续性差;当加热电流降低至 90 A 时,焊缝表面均光滑平坦,焊缝成形良好;当加热电流进一步降低至 40 A 时,焊缝表面高低不平,焊缝成形恶化。



图 7 加热电流对窄间隙焊缝成型的影响。(a) 120 A, 熔断过渡; (b) 90 A, 连续过渡; (c) 40 A, 顶丝过渡

Fig. 7 Influence of heating current on narrow gap weld formation, (a) 120 A, fusing transfer;

(b) 90 A, continuous transfer; (c) 40 A, wire hit transfer

窄间隙激光热丝焊加热电流对焊丝过渡行为的影响规律如图 8 所示。将相同工艺参数下窄间隙焊丝过渡行为与平板堆焊焊丝过渡行为(图 6)进行比较发现,当加热电流为 120 A 时,焊丝均在熔池外发生熔断,焊丝过渡行为是熔断过渡;当加热电流减小至 90 A 时,焊丝均在熔池内稳定熔化,焊丝过渡行

为是连续过渡;当加热电流进一步减小至 40 A 时,焊丝均在熔池内不停摇摆,焊丝过渡行为是顶丝过渡。由以上分析可知,即在工艺参数相同的情况下,窄间隙激光热丝焊的焊缝成形和焊丝过渡行为与平板堆焊是相同的。

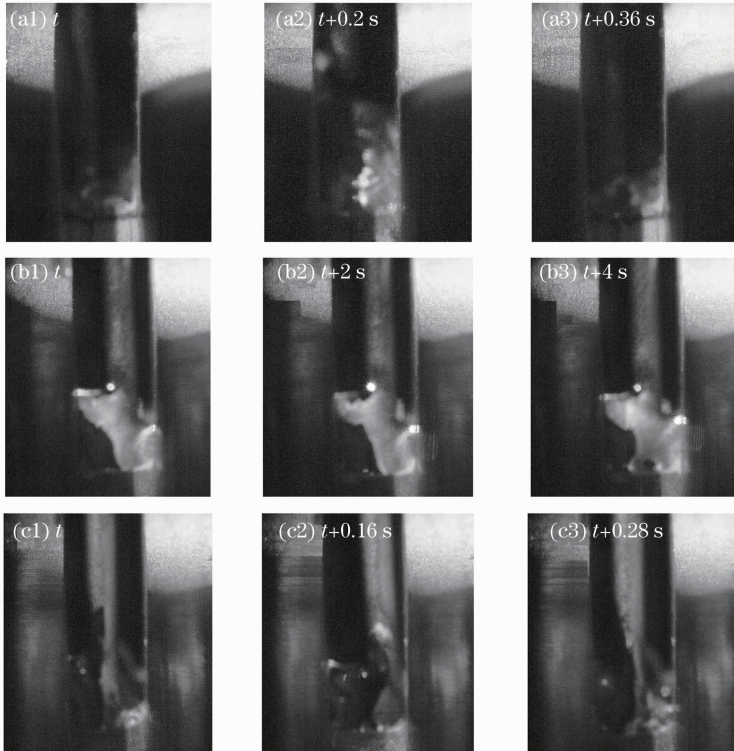


图 8 窄间隙焊接时的焊丝过渡行为。(a1)~(a3) 120 A 熔断过渡; (b1)~(b3) 90 A 连续过渡;

(c1)~(c3) 40 A 顶丝过渡

Fig. 8 Wire transfer behavior of narrow gap welding. (a1)~(a3) 120 A fusing transfer; (b1)~(b3) 90 A continuous transfer; (c1)~(c3) 40 A wire hit transfer

### 3.4 焊丝过渡稳定性的控制原则

熔断过渡、连续过渡和顶丝过渡 3 种焊丝过渡行为的重要区别是焊丝熔化点相对熔池的位置不

同,如图 9 所示。对于熔断过渡,焊丝在熔池外即发生熔化,所以焊丝在与熔池界面相交的 A 点处的温度  $T_A$  在某些时刻必然会超过焊丝熔点  $T_m$ ;对于顶

丝过渡, 固态焊丝与熔池壁发生顶触, 那么当焊丝刚到达  $B$  点时的温度  $T_B$  必然会低于焊丝熔点  $T_m$ ; 连续过渡介于熔断过渡与顶丝过渡之间, 焊丝始终在

熔池内发生熔化, 即  $T_A < T_m < T_B$ 。由此可知, 焊丝温度变化是导致焊丝熔化点位置变化的原因, 因此需要对焊丝获得的热量进行深入分析。

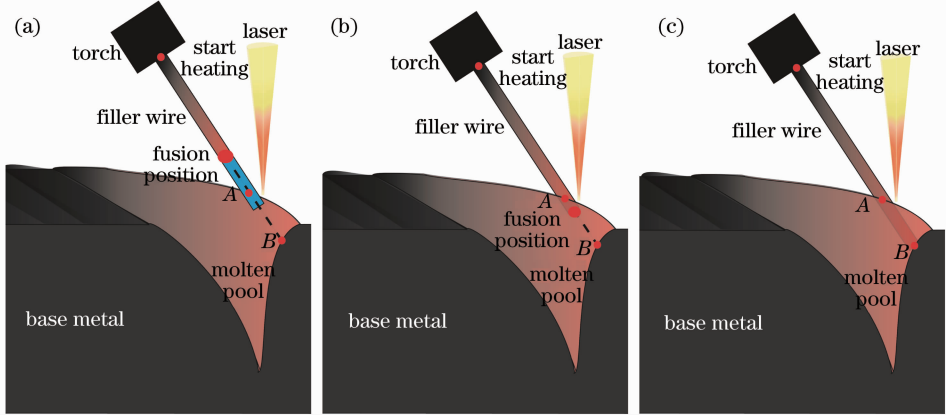


图 9 不同焊丝过渡行为中焊丝熔化位置示意图。(a) 熔断过渡; (b) 连续过渡; (c) 顶丝过渡

Fig. 9 Sketch of wire fusion position in various wire transfer behaviors. (a) Fusing transfer; (b) continuous transfer; (c) wire hit transfer

焊丝获得的热量可以分为熔池外焊丝获得的热量和熔池内焊丝获得的热量两个部分。熔池外焊丝获得的热量包括电阻热  $Q_R$ 、熔池传热  $Q_C$  和金属蒸气热辐射  $Q_E$ 。由于激光采用热导焊模式, 金属蒸气量很少, 因此热辐射  $Q_E$  可以忽略; 熔池热量通过热传导的方式传递到焊丝上, 由于焊丝从导电嘴运动到熔池的时间很短, 且焊丝横截面较小, 因此熔池外焊丝获得的熔池传热量也可以忽略。即认为熔池外焊丝获得的热量主要来自于电阻热  $Q_R$ 。熔池内焊丝获得的热量包括电阻热  $Q_R$  和熔池传热  $Q_C$ 。熔池通过热传导和热对流两种方式向焊丝传热, 由于焊丝直接插入在高温熔池中, 获得的熔池传热量较大; 此时焊丝上的电流密度大大降低, 焊丝获得的电阻热量减小至可以忽略。即认为熔池内焊丝获得的热量主要来自于熔池传热  $Q_C$ 。

结合焊丝过渡行为分类以及焊丝受热分析, 可以得到焊丝获得热量对焊丝过渡行为的影响规律。若电阻热  $Q_R$  大于焊丝熔化所需热量  $Q_m$ , 电阻热即可将焊丝加热至熔化, 此时熔池外的焊丝发生熔化爆断, 即熔断过渡。若  $Q_R < Q_m < Q_R + Q_C$ , 仅靠电阻热量不能熔化焊丝, 只有焊丝进入熔池获得熔池传热  $Q_C$  后才能在液态熔池内部发生熔化, 即连续过渡。若  $Q_m > Q_R + Q_C$ , 电阻热和熔池传热之和仍然不能使焊丝熔化, 焊丝无法在液态熔池内熔化, 固态焊丝必然会与熔池壁发生顶触, 即顶丝过渡。

由以上分析可得焊丝过渡稳定性的控制原则: 一是焊丝始终与熔池保持接触, 即  $Q_R < Q_m$ ; 二是熔池内的焊丝在与熔池壁顶触之前发生熔化, 即  $Q_m <$

$Q_R + Q_C$ 。

### 3.5 熔池外焊丝温度的计算

根据焊丝过渡稳定性的控制原则可知, 电阻热量  $Q_R$  对于焊丝过渡稳定性有十分重要的影响。首先,  $Q_R$  直接决定了是否会发生熔断过渡。其次,  $Q_R$  决定了获得稳定焊丝过渡时所需熔池传热量的大小。在焊丝不发生熔断的前提下, 足够高的  $Q_R$  可以减小焊丝熔化对熔池传热的依赖, 有利于降低对激光热输入的要求, 获得高效率、低能耗的焊接过程。

假设长度无限小的一段焊丝  $dx$  在从加热点运动到熔池  $A$  点获得的电阻热量为  $dQ_R$ , 即

$$dQ_R = I^2 dR dt = I^2 \rho_0 (1 + \alpha T) \frac{4 dx}{\pi D^2} \frac{dx}{v}, \quad (1)$$

式中  $I$  为加热电流,  $dR$  为焊丝电阻,  $dt$  为加热时间,  $\rho_0$  为  $0^\circ\text{C}$  时焊丝的电阻率,  $\alpha$  为电阻率温度系数,  $T$  为温度,  $D$  为焊丝直径,  $v$  为送丝速度。

焊丝获得的热量引起温度升高, 即

$$dQ = C(T) dm dT = C_0 (1 + \beta T) \rho \frac{\pi D^2 dx}{4} dT, \quad (2)$$

式中  $C(T)$  为焊丝定压比热, 是温度的函数;  $dm$  为  $dx$  长度焊丝的质量;  $dT$  是焊丝升高的温度,  $C_0$  是  $0^\circ\text{C}$  时焊丝的比热,  $\beta$  为比热温度系数,  $\rho$  焊丝密度。

联立(1)式和(2)式可得

$$dT = \frac{16 \rho_0 I^2}{C_0 v \rho \pi^2 D^4} \frac{1 + \alpha T}{1 + \beta T} dx. \quad (3)$$

对(3)式中的微分方程在焊丝长度方向进行积分, 所用边界条件为  $x=0$  时  $T=25^\circ\text{C}$ , 即在导电嘴夹持

端焊丝开始进行加热处,焊丝温度仍然为室温。由此可得焊丝长度方向上的温度分布函数

$$(\alpha - \beta)\ln(1 + \alpha T) + \alpha\beta T = \frac{16\rho_0\alpha^2 I^2}{C_0 v \rho \pi^2 D^4} x + 25\alpha\beta. \quad (4)$$

由(4)式可知,熔池外焊丝温度随加热电流平方 $I^2$ 的减小和送丝速度 $v$ 的增加而减小。查找相关的常数 $\alpha = 1.33 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\beta = 7.27 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,

表2 不同电流和送丝速度对应的 $T_A$

Table 2  $T_A$  on various currents and wire feeding rates

Heating current / A	Wire feeding rate / (m · min <sup>-1</sup> )	$T_A / \text{ }^\circ\text{C}$	Wire transfer behavior
120	2	2611, much larger than wire fusion point	fusing transfer
90	1	2990, much larger than wire fusion point	fusing transfer
90	2	1366, close to wire fusion point	continuous transfer
90	3	862, much smaller than wire fusion point	wire hit transfer
40	2	231, much smaller than wire fusion point	wire hit transfer

由表2可知,当熔池外焊丝温度超过焊丝熔点时,熔池外的焊丝发生熔断,焊丝过渡行为是熔断过渡,与实验结果相符合。当熔池外焊丝温度接近焊丝熔点时,熔池只需要向焊丝传递少量热量即可使焊丝发生熔化,容易获得稳定的焊丝过渡,实验结果表明此时的焊丝过渡行为表现为连续过渡,说明实际的熔池传热大于获得稳定焊丝过渡所需熔池传热的最小值。当熔池外焊丝温度远低于焊丝熔点时,熔池需要向焊丝传递大量热量才能使焊丝发生熔化,实验结果表明此时的焊丝过渡行为是顶丝过渡,说明实际的熔池传热小于获得稳定焊丝过渡所需的熔池传热,只有进一步增加激光热输入才能获得稳定的焊丝过渡。由以上分析可知,充分利用电阻热量将焊丝加热至接近焊丝熔点温度时,增大了获得稳定的焊丝过渡的激光热输入的工艺窗口,有利于获得良好的焊缝成形。但如果要实现具体工艺参数下焊丝过渡稳定性的准确判断,除了计算焊丝获得的电阻热量外,还需要进一步计算焊丝获得的熔池传热,从而根据焊丝过渡稳定性的控制原则进行判断。

## 4 结 论

1) 研究了工艺参数对焊缝成形的影响规律,发现工艺参数是通过影响焊接过程中的焊丝过渡行为来影响焊缝成形的。在本实验条件下,当激光功率为2 kW,光丝距为1 mm,加热电流为90 A,送丝速度为2 m/min时,焊丝过渡平稳,焊缝成形最佳。

2) 高速摄像发现,激光热丝焊焊丝过渡行为具

$\rho_0 = 6.74 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \Omega$ ,  $C_0 = 458 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ ,  $\rho = 7.9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $D = 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,对于A点取 $x = 0.031 \text{ m}$ 。代入(4)式中计算不同电流和送丝速度对应的 $T_A$ ,如表2所示。激光功率为2000 W,焊接速度为0.5 m/min,焊丝干伸长为35 mm,光斑直径为3 mm

有滴状过渡、熔断过渡、连续过渡和顶丝过渡4种类型。滴状过渡无法实现加热焊丝的功能,且焊缝不连续;熔断过渡和顶丝过渡属于不稳定的焊丝过渡,前者导致飞溅产生,焊缝连续性差,后者导致驼峰焊道的形成。连续过渡是稳定的焊丝过渡行为,是获得良好焊缝成形的基础。

3) 影响焊丝过渡稳定性的本质是焊丝受热量变化所引起的焊丝熔化位置的变化。获得稳定焊丝过渡的控制原则是:焊丝获得的电阻热小于焊丝熔化所需热量,即保证焊丝始终与熔池保持接触,并且焊丝获得的电阻热和熔池传热之和大于焊丝熔化所需热量,即保证焊丝在与熔池底部顶触之前发生熔化。

4) 通过数学推导获得了熔池外焊丝温度的理论表达式,计算并且对比了不同电流和送丝速度下熔池外焊丝进入熔池时的温度 $T_A$ ,发现当 $T_A$ 接近焊丝熔点温度时,有利于获得稳定的焊丝过渡。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section stainless steel plants[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2422-2425.  
吴世凯,肖荣诗,陈 恺.大厚度不锈钢板的激光焊接[J].中国激光,2009,36(9):2422-2425.
- 2 Wang Baiping, Zhao Yong, Huang Jian. Investigation on microstructure of thick plate stainless steel joint welded by multi-pass laser welding with filler wire[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0203008.  
王柏平,赵 勇,黄 坚.厚板不锈钢激光填丝多道焊的接头组织分析[J].中国激光,2013,40(2):0203008.
- 3 U Dilthey, S Bohm, G Trager, et al.. Laser-beam and electron-beam welding of material combinations consisting of cast iron and

- case-hardening or heat-treatable steels[J]. *Welding and Cutting*, 1998, 50(7): 214—216.
- 4 T Jokinen, M Karhu, V Kujanpää. Welding of thick austenitic stainless steel using Nd:YAG laser with filler wire and hybrid process[C]. *Laser Institute of America*, 2002. 1—10.
- 5 A Salminen. The filler wire-laser beam interaction during laser welding with low alloyed steel filler wire[J]. *Mechanika*, 2010, 84(4): 67—74.
- 6 Salminen Antti. The effects of filler wire feed on the efficiency of laser welding[C]. *SPIE*, 2003, 4831: 263—268.
- 7 Janne Nurminen, Jouko Riihimäki, Jonne Näkki. Comparison of laser cladding with powder and hot and cold wire techniques[C]. *ICALEO*, 2006. 634—637.
- 8 Janne Nurminen, Jouko Riihimäki, Jonne Näkki. Hot-wire cladding process studies[C]. *ICALEO*, 2007. 947—952.
- 9 Xiao Rongshi, Zuo Tiechuan, Günter Ambrosy. Investigation on current enhanced CO<sub>2</sub> laser welding of aluminum[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(3): 359—362.  
肖荣诗, 左铁钊, Günter Ambrosy. 电流强化铝合金 CO<sub>2</sub> 激光焊接[J]. *中国激光*, 2004, 31(3): 359—362.
- 10 Ohnishi Terumasa, Kawahito Yousuke, Katayama Seiji. High-power and high-brightness laser butt welding with using hot wire for thick high-strength steel plate[J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2011, 29(1): 41—47.
- 11 Li Liqun, Tao Wang, Zhu Xianliang. Wire filling multilayer welding of high strength steel thick plate[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(5): 1251—1255.  
李俐群, 陶汪, 朱先亮. 厚板高强度钢激光填丝多层焊工艺[J]. *中国激光*, 2009, 36(5): 1251—1255.
- 12 Yu Yangchun. Study on the Technology and Filler Wire Melting Dynamics during the Laser Welding with Filler Wire [D]. *Wuhan: Huazhong University of Science and Technology*, 2010.  
余阳春. 激光填丝焊焊丝熔入行为及工艺研究[D]. *武汉: 华中科技大学*, 2010.
- 13 Yamamoto Motomichi, Shinozaki Kenji, Kadoi Kota. Development of hot-wire laser welding method for lap joint of steel sheet with wide gap[J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2011, 29(3): 58—61.
- 14 Yamamoto Motomichi, Shinozaki Kenji, Kadoi Kota. Development of high-efficiency high-quality hot-wire laser fillet welding process [J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2011, 29(3): 62—65.
- 15 Wen Peng, Zheng Shiqing, Shinozaki Kenji. Experimental research on laser narrow gap welding with filling hot wire[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(11): 1103004.  
温鹏, 郑世卿, 荻崎贤二. 填充热丝激光窄间隙焊接的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1103004.

栏目编辑: 宋梅梅