

激光焊接时焊接模式转变规律及 焊接过程稳定性的研究*

陈武柱 张旭东 任家烈 王振家 黄国庆 张红军

(清华大学激光加工研究中心, 北京 100084)

提要 在大功率激光焊接时,除了通常认为的稳定深熔焊和稳定热导焊外,作者发现在一定条件下还会出现第三种焊接过程——模式不稳定激光焊接,其基本特征是深熔焊和热导焊两种模式随机出现,熔深和熔宽相应地在大小两级跳变。综合研究了焦点位置、激光功率和焊接速度对激光焊接模式及焊缝成型的影响,得到了反映上述三种焊接过程的工艺参数范围的双U型激光焊接模式转变曲线。

关键词 激光焊接, 深熔焊, 热导焊, 焊接模式转变

1 引言

大功率激光焊接时,根据是否产生小孔效应通常将焊接过程分为两种焊接模式:热导焊和深熔焊。日本学者 I. Miyamoto 和 Y. Arata 最早描述了激光焊接时称之为焊缝突变 (bead-transition), 实质为焊接模式转变的现象: 即在一定工艺条件(一定焊接材料、激光功率和焊接速度)下,随焦点位置的变化,激光焊接会从稳定热导焊跳变至稳定深熔焊,又从稳定深熔焊跳变至稳定热导焊,焊缝熔深和熔宽也相应地发生突变^[1]。为了获得稳定的激光焊接过程,保证焊缝成型质量,就必须深入研究这种焊接模式转变的规律和影响模式转变的各种因素。本文对激光焊接的三个重要工艺参数:激光功率、焊接速度和焦点位置单独和综合对焊接模式及焊缝成型的影响进行了大量的实验和分析,发现除了稳定热导焊和稳定深熔焊外,还存在第三种焊接过程——模式不稳定焊接过程,并得出了反映三种焊接过程的工艺参数范围的双U型模式转变曲线。这对深入认识激光深熔焊规律和正确选择工艺参数都有重要意义。

2 实验条件

实验中使用厚度为 2 mm 和 5 mm 的低碳钢板,激光器为 3 kW 快轴流 CO₂ 激光器,采用连续激光,光束模式为 TEM₀₀+TEM₀₁,透镜材料 ZnSe,焦距 129 mm,保护气体为 Ar,轴向流量为 400 L/h,环向流量为 3000 L/h。实验结果是采用平板堆焊的方法得出。

* 清华大学校内基金资助项目。

收稿日期: 1995年7月17日; 收到修改稿日期: 1995年11月6日

3 实验结果及分析

3.1 各工艺参数对焊接模式的影响

3.1.1 焦点位置的影响——两种焊接模式和三种焊接过程

焦点位置是指焦点距工件表面的距离,定义焦点在工件表面以下为正(入焦),反之为负(离焦)。图1是熔深与焦点位置的关系曲线。可以看出,在一定工艺条件(5 mm 低碳钢板, 2000 W, 2 m/min)下,随着焦点位置的变化,在离焦 2.5 mm 和入焦 3 mm 附近产生焊接模式的转变。

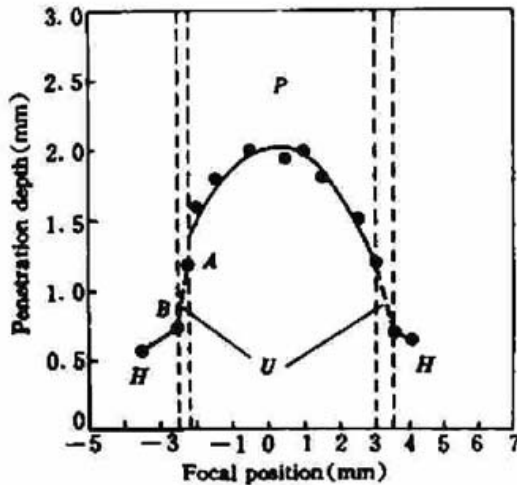


Fig. 1 Penetration depth as a function of focal position.
material, mild steel; thickness, 5mm; laser power, 2000 W; travel speed, 2 m/min

但这种模式的转变并不象过去人们认识的那样由热导焊突然转变为深熔焊,或由深熔焊突然转变为热导焊,而是要经过一个过渡区。对应于该过渡区的焊接过程的基本特征是焊接模式很不稳定:热导焊和深熔焊随机出现,熔宽和熔深也相应在大小两级间跳变(例如离焦 2.5 mm 时熔深在图1中的 A, B 两点间跳变)。作者把它称之为模式不稳定的激光焊接过程(本文图中的 H, U, P 分别表示稳定热导焊、模式不稳定焊和稳定深熔焊三种过程)。经过我们大量的实验观察和

检测,证明了这种模式不稳定焊接过程的存在,它和通常所知的稳定热导焊和稳定深熔焊比较,三者焊接时的物理现象和焊缝成型方面都有根本的区别。

稳定热导焊过程:焊接时产生桔红色火焰并伴随轻微的“咪咪”声,熔深和熔宽均很小,但焊缝全长成型均匀[图2(a)]。

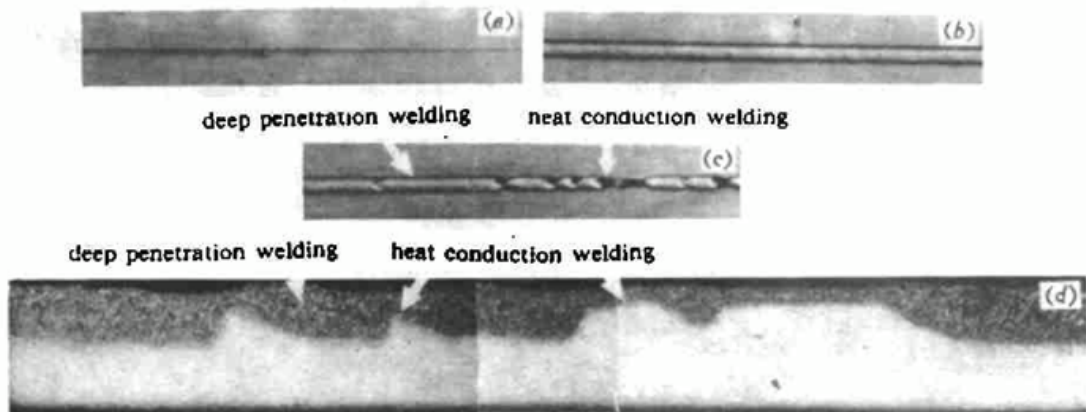


Fig. 2 Weld-forming of three kinds of laser welding process

(a) bead appearance of stable heat conduction welding; (b) bead appearance of stable deep penetration welding;
(c) bead appearance of unstable-mode welding; (d) longitudinal profile of unstable-mode welding

稳定深熔焊过程:焊接时产生均匀的蓝色火焰和强烈的尖锐的爆破声响,显示出焊接自始至终有激光等离子体产生,并有金属蒸气连续不断从小孔中喷出来。熔深和熔宽比热导焊大幅度提高,焊缝全长成型均匀[图2(b)]。

模式不稳定焊接过程:焊接时蓝色等离子体火焰时有时无,尖锐的金属蒸气喷出声音相

应断断续续。在蓝色火焰和尖锐声消失瞬间出现的是桔红色火焰和轻微的“哧哧”声, 显示出整个焊接过程是深熔焊和热导焊无规则地随机变化。观察焊缝成型, 也可以十分清楚地看到这种焊接模式随机变化的特征: 处于深熔焊模式时, 焊缝宽, 熔深大, 变为热导焊时, 焊缝突然变窄, 熔深突然变小〔图 2(c), (d)〕。

图 2(a), (b), (c) 照片分别表示图 1 所示的三个区域: 稳定热导焊、稳定深熔焊和模式不稳定焊的焊缝外观情况。图 2(d) 照片表示模式不稳定焊缝纵断面情况, 从该照片可见, 由深熔焊模式变为热导焊模式时, 熔深的减小很陡, 而热导焊模式转变为深熔焊模式时, 熔深的增大较缓。这可以用深熔焊小孔形成和消失的动态过程来解释: 小孔形成和加深涉及金属的汽化和小孔内蒸气压的增长, 需要一定时间, 不能瞬间完成, 而小孔的消失速度则要快得多。

3.1.2 激光功率的影响

图 3 是激光功率对焊接熔深和熔宽的影响规律曲线。由图可见, 当焦点位置和焊接速度一定时, 随着激光功率的增加, 也会依次出现稳定热导焊、模式不稳定焊和稳定深熔焊三种完全不同的焊接过程。同样不是过去人们认识的那样, 大于某一功率阈值, 热导焊就突变为深熔焊, 也要经过一个过渡区。在这里, 存在两个功率阈值 P_{c1} 和 P_{c2} , 当激光功率小于 P_{c1} 时, 为稳定热导焊, 焊缝成型均匀, 熔深和熔宽都很小; 当激光功率大于 P_{c2} 时, 为稳定深熔焊, 焊缝成型也很均匀, 但熔深和熔宽显著大于热导焊, 而且随功率的增加而增加。激光功率处于 P_{c1} 和 P_{c2} 之间则为模式不稳定焊接区。这三种过程焊接时的物理现象和改变焦点位置所碰到的情况是一样的, 焊缝成型特点也和图 2 所示照片完全相同。

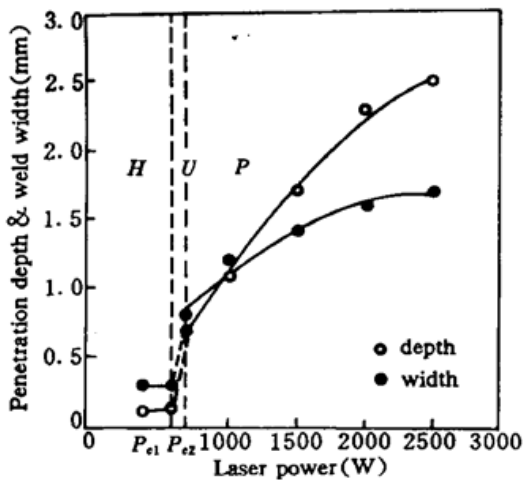


Fig. 3 Penetration depth and weld width as a function of laser power

material: mild steel; thickness: 5 mm; focal position: 1 mm; welding speed: 1.5 m/min

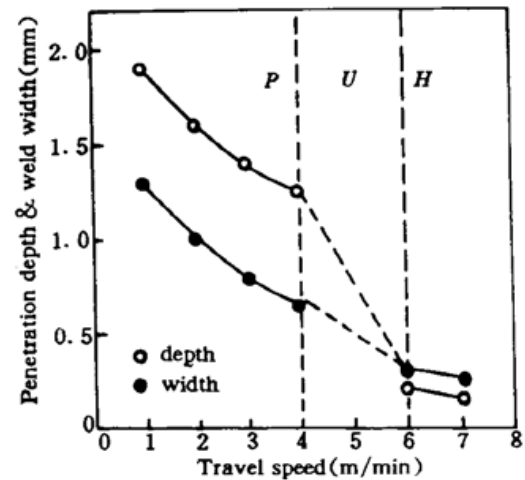


Fig. 4 Penetration depth and weld width as a function of welding speed

material: mild steel; thickness: 2 mm; focal position: -0.5 mm

3.1.3 焊接速度的影响

实验结果如图 4 所示, 当激光功率和焦点位置一定时, 随着焊接速度的增加, 同样依次出现稳定深熔焊、模式不稳定焊和稳定热导焊三种焊接过程, 其焊接过程的物理现象和焊缝成形特点与上述焦点位置及激光功率的影响结果一样。这说明焊接速度也是影响激光焊接模式的重要工艺参数, 只不过在较大的激光功率密度时, 需要很高的焊接速度才会出现模式不稳定焊甚至稳定热导焊过程。

综上所述,大功率激光焊接时,根据熔池形成的机理可分为热导焊和深熔焊两种模式,但从焊接过程的特点来考察,却可分为稳定热导焊、模式不稳定焊和稳定深熔焊三种过程。焦点位置、激光功率和焊接速度是影响焊接模式和焊接过程的三个主要工艺参数,改变其中一个参数,都可能引起焊接模式和焊接过程的变化,从而影响焊接过程稳定性和焊缝成形质量。为了确定和分析某一条件下激光焊接过程的特点,需考察上述工艺参数的综合影响。

3.2 工艺参数对焊接模式的综合影响

3.2.1 激光功率-焦点位置的综合影响——双U型激光焊接模式转变曲线

焊接速度一定的条件下,对某一焦点位置可以找到稳定深熔焊的最小功率和稳定热导焊的最大功率,改变焦点位置,就可得到稳定深熔焊和稳定热导焊的临界功率与焦点位置的关系

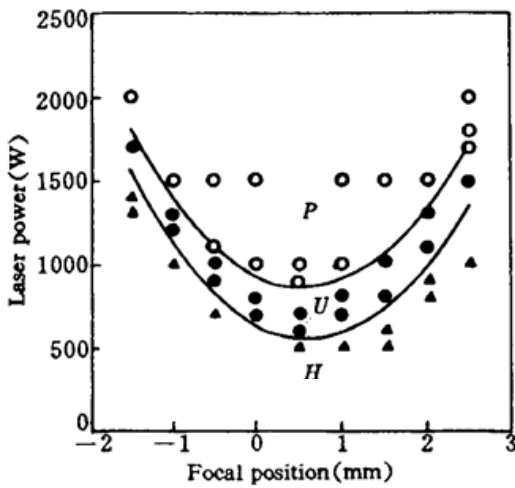


Fig. 5 Mode transition curve determined by laser power and focal position
material, mild steel; thickness, 2 mm;
travel speed, 2 m/min

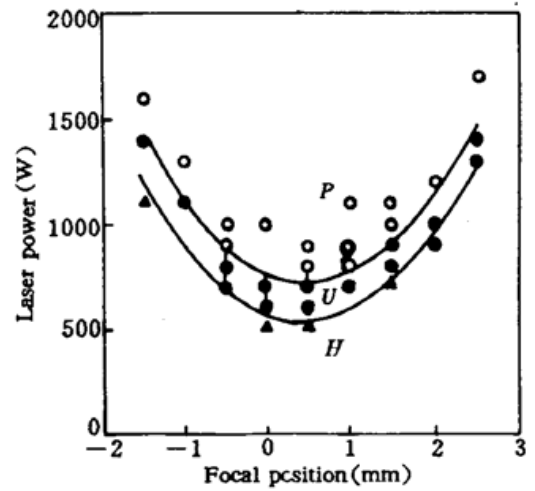


Fig. 6 Mode transition curve determined by laser power and focal position
material, mild steel; thickness, 2 mm;
travel speed, 1 m/min

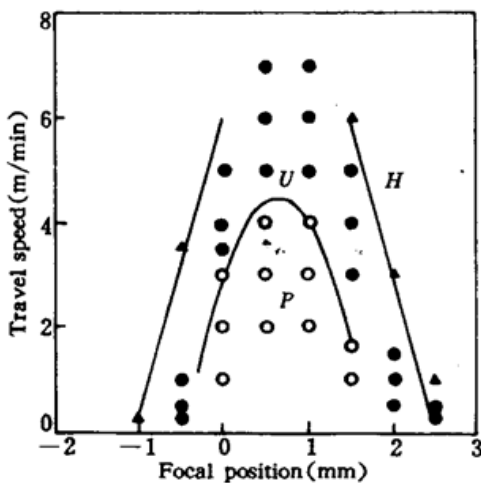


Fig. 7 Mode transition curve determined by travel speed and focal position
material, mild steel; thickness, 2 mm;
laser power, 1000 W

曲线(图 5),该曲线同时表示了不同功率时可以形成稳定深熔焊和稳定热导焊的焦点位置范围。由于曲线呈 U 型,可以确定焊接模式的转变条件,所以作者称之为双 U 型模式转变曲线。由图可见,随着功率提高,可以形成稳定深熔焊的焦点位置范围增大,当功率低于某值时,无论选择怎样的焦点位置都不可能形成稳定深熔焊。

3.2.2 焊接速度-焦点位置的综合影响

比较图 5 和图 6,在同样的功率下,焊接速度的提高使稳定深熔焊的焦点位置范围略有减小,也就是说,焊速增大会引起双 U 型模式转变曲线的上移。

图 7 是激光功率一定(1000 W)时,焊接速度与焦点位置对激光焊接模式的综合作用图。由图可见,由焊接速度和焦点位置确定的焊接模式转变曲线近似为倒双 U 型曲线,即随着焊接速

度的提高,可形成稳定深熔焊的焦点位置范围变小,当焊接速度超过 5 m/min 时,焦点无论选择什么位置都不可能形成稳定深熔焊。还可看出,本试验所用最高速度为 7 m/min,尚未达到模式不稳定焊接区的顶点。

在实际的焊接中,应根据焊件熔深的需要选择焊接规范,使其工作点在稳定深熔焊或稳定热导焊范围,但要绝对避免落入模式不稳定焊接区。另一方面,我们也可根据焊接过程中的物理现象和焊缝成型特点,来决定其属于什么样的焊接过程,工作点位于双 U 型模式转变曲线图中什么位置,从而决定该如何调整工艺参数。

综上所述,我们可以得出以下结论:

(1) 激光焊接时,根据工艺参数的不同可以出现稳定热导焊、模式不稳定焊和稳定深熔焊三种焊接过程。其中模式不稳定焊的基本特征是深熔焊和热导焊两种模式随机出现,熔深和熔宽相应地在大小两级跳变,焊缝成型极不均匀。

(2) 实际焊接时,应根据焊件对熔深的要求选择稳定深熔焊过程和稳定热导焊过程,而要避免产生模式不稳定焊接过程。

(3) 所提出的包括三种焊接过程工艺参数范围的双 U 型激光焊接模式转变曲线,综合了激光功率-焦点位置或焊接速度-焦点位置对焊接模式和焊缝成型的影响,为正确选择焊接工艺参数,获得所需模式的稳定焊接过程提供了科学的依据。

参考文献

- 1 I. Miyamoto, H. Maruo, Y. Arata. Mechanism of bead-transition in laser welding. Int. Conf. on Welding Research in 1980's, 1980. 103~107

Study on Welding Mode Transition and Stability of Welding Process in Laser Welding

Cheng Wuzhu Zhang Xudong Ren Jialie Wang Zhenjia
Huang Guoqing Zhang Hongjun

(Laser Processing Center of Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract We have discovered a third welding process—unstable-mode welding (UMW) under a certain condition, apart from the already known stable deep penetration welding (DPW) and stable heat conduction welding (HCW) in a high-power laser welding. UMW has a basic feature that the two welding modes (DPW and HCW) appear intermittently with extremely varying penetration depths and welding widths. In this paper, effects of welding parameters (focal position, laser power and moving speed) on laser welding mode and weld forming have been comprehensively studied. Double-U curves of laser welding mode transition have been obtained, which can be used to determine the process parameters of the three mentioned welding processes.

Key words laser welding, deep penetration welding (DPW), heat conduction welding (HCW), welding mode transition