

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0274-05

CO₂ 激光-MIG 复合对接焊熔透工艺

双元卿¹, 王康健¹, 陈武柱¹, 单际国¹, 张永强²

(¹清华大学机械工程系, 北京 100084; ²首钢技术研究院, 北京 100041)

摘要 在有坡口间隙对接焊时, 焊缝根部成形状态是衡量复合焊搭桥质量及其适应能力的重要指标。因此研究了 CO₂ 激光-惰性气体金属弧焊(MIG)复合焊接 3 mm 厚不锈钢板时激光功率、电弧电流、激光-电弧距离、焊接速度、坡口间隙等工艺参数对根部熔宽的影响, 并通过 CCD 摄像机对焊接过程中的等离子体进行了观察。研究表明, 随着焊接参数的变化, CO₂ 激光-MIG 复合焊存在四种熔透状态, 对某一间隙范围, 选择合适的激光功率、电弧电流、激光-电弧距离与焊接速度可以获得“适度熔透”的良好根部成形。激光功率、电弧电流过小, 速度过大则会产生“未熔透”或“不稳定熔透”, 反之则“过熔透”。间隙较大时, 激光功率对熔透的影响较小。另外还研究了不同激光-电弧距离对等离子体形态及其对熔透的影响。

关键词 激光技术; CO₂ 激光-MIG 复合焊; 工艺参数; 熔透状态; 背面熔宽

中图分类号 TN253 文献标识码 A

Penetration Statuses of CO₂ Laser-MIG Hybrid Butt Welding with Various Parameters

SHUANG Yuan-qing¹, WANG Kang-jian¹, CHEN Wu-zhu¹,

SHAN Ji-guo¹, ZHANG Yong-qiang²

(¹ Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)
(² Shougang Technical Research Institute, Beijing 100041, China)

Abstract Formation of weld root is an important criterion to evaluate the gap bridging ability and weld quality of hybrid welding in gapped butt welding. Therefore in CO₂ laser-MIG hybrid welding of stainless steel with 3 mm thick, the effect of welding parameters such as laser power, arc current, distance of laser to arc, welding speed and gap width influencing root width of weld were investigated. Both laser plasma and arc plasma were also observed by CCD camera. The result indicates that there are four types of penetration status with the variation of welding parameters in CO₂ laser-MIG hybrid welding. Fine root formation with “moderate full penetration” status can be acquired with appropriate laser power, arc current, distance of laser to arc and welding speed in certain gap. “Partial penetration” and “unstable penetration” will be produced with smaller laser power, or smaller arc current, quicker welding speed, contrarily it will be “excessive penetration”. Effect of laser power on penetration is not effective for bigger gap width. Effect of distance of laser to arc on plasma and root width of weld has also been discussed.

Key words laser technique; CO₂ laser-MIG hybrid welding; welding parameter; penetration status; root width of weld

1 引 言

激光焊接与传统焊接方法相比较, 具有高能量密度、低热输入、小变形、易实现自动控制等优点, 在工业生产中得到了越来越多的重视。但是, 在激光

对接焊中, 对坡口加工和装配的精度要求很高, 在坡口间隙稍大的情况下, 很容易出现焊缝表面凹陷的缺陷, 甚至激光光点从间隙中漏掉, 无法焊接。由于激光-惰性气体金属弧焊(MIG)复合焊具有很强的

基金项目: 国家自然科学基金项目(50175061)资助课题。

作者简介: 双元卿(1982—), 男, 江西临川人, 博士研究生, 主要从事激光-电弧复合焊接质量控制方面的研究。

E-mail: syq02@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介: 陈武柱(1939—), 男, 广西人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工及其过程检测与控制方面的研究。

E-mail: cwz-dme@mail. thu. edu. cn

搭桥能力,在较大的间隙内仍可获得良好的焊缝成形。而且,由于其熔深大、效率高、气孔少等优点^[1],激光-电弧复合焊作为激光焊的重要补充和发展,在汽车、造船、起重机械等领域得到日益广泛的应用^[2]。各国学者也对复合焊接的工艺参数、激光与电弧相互作用规律进行了很多的研究^[3]。但目前对于复合焊熔透的工艺研究很少^[4],而对于坡口间隙对接焊来说,衡量焊接成形质量一个重要的指标是焊缝的熔透状态,要求完全熔透,首先必须保证焊缝根部良好的熔合,不允许未熔透和过熔透。因此,为了研究激光-电弧复合焊工艺参数对熔透情况的影响,以期对实际生产产生指导意义,本文采用 CO₂ 激光与 MIG 复合的方法对 3 mm 厚不锈钢板进行了对接焊实验。实验过程中,研究了激光功率、电弧电流、激光-电弧距离、焊接速度、坡口间隙等对复合焊缝熔透状态的影响,并通过 CCD 摄像机对焊接过程中的激光和电弧等离子体进行了观测。

2 实验设备及材料

实验采用的激光器为美国 PRC 公司的 3 kW 快轴流 CO₂ 激光器,采用反射镜聚焦,焦距 190 mm;电弧焊机为松下 YD-350AG2,输出电流 40~350 A,焊丝直径 1.2 mm。CO₂ 激光-MIG 复合焊装置如图 1 所示,激光垂直于工件表面,MIG 焊枪与工件夹角为 60°,焊接方向采用激光在前、电弧在后的方式。工件为 3 mm 厚 304 不锈钢板,大小 200 mm×50 mm,表面经砂纸打磨和丙酮擦拭。焊接过程采用对接焊,坡口间隙 d 分别为 0, 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm 和 2.0 mm。

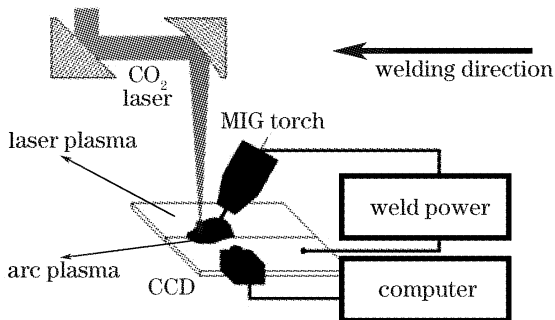


图 1 CO₂ 激光-MIG 复合焊装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CO₂ laser-MIG hybrid welding equipment setup

3 实验结果和分析

在 CO₂ 激光-MIG 复合对接焊中,随着工艺参数的不同,焊缝熔透状态也有所不同。对接焊中,可

以根据焊缝背面熔宽 Wb 与工件间隙宽度 d 的关系来评价焊缝的熔透状态。一般可以将对接焊熔透情况分为如图 2 四种典型状态,坡口形状如图 3。

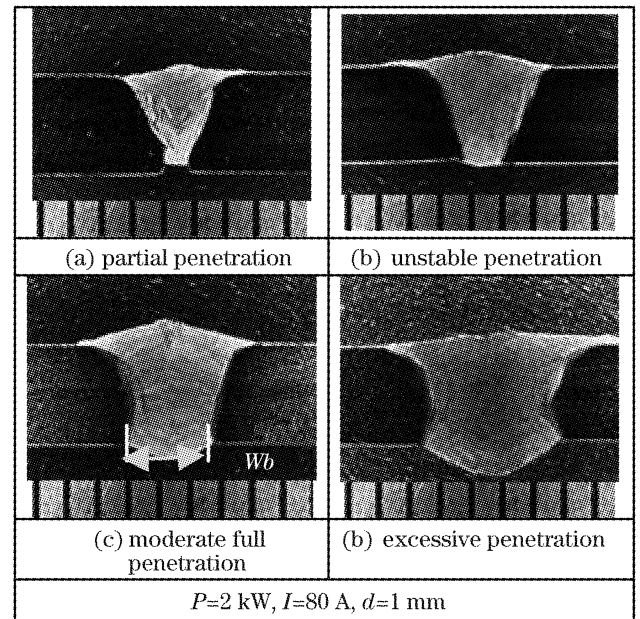


图 2 不同熔透状态焊缝截面

Fig. 2 Cross section of weld in different penetration status

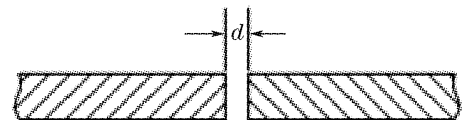


图 3 对接焊坡口形状示意图

Fig. 3 Schematic diagram of gap in butt welding

1)“未熔透”: $Wb < d$,焊缝截面如图 2(a),焊接过程中金属液体没有完全达到工件间隙的下表面,焊后在焊缝背面看到明显的凹陷。由于未能将背面间隙填满,不存在背面熔宽;或者接近间隙下表面,但未能充分填满,小于 1 倍的间隙宽度 d ,因此称为“未熔透”。

2)“不稳定熔透”: $d \leq Wb \leq 1.5d$,截面如图 2(b),焊接过程中,金属液体正好达到工件下表面,而且也填满间隙,但背面熔宽 Wb 与间隙 d 相差不大,焊缝背面也几乎没有余高,这种状态虽然也属于熔透范围,但因背面熔宽 Wb 较小,焊接条件稍有波动则背面间隙不能填满,熔透不稳定,因此属于“不稳定熔透”。

3)“适度熔透”: $1.5d < Wb < 3d$,截面如图 2(c),焊接过程中,金属液体完全填满间隙,正背面成形良好,背面余高合适,背面熔宽均匀适度,熔透充分。

4)“过熔透”: $Wb \geq 3d$,而且背面余高太高,焊缝截面如图 2(d)所示,由于焊接过程线能量过大,金属熔化量多,导致焊缝背面凸起严重,背面熔宽、余高明显大于适度熔透。“过熔透”状态下存在焊缝

热影响区大,工件变形严重等问题,而且背面余高过高也易导致应力集中的缺陷。

上述四种熔透状态中,以“适度熔透”最佳,熔透稳定,焊缝成形均匀美观。在 CO₂ 激光-MIG 复合焊中,由于涉及的工艺参数较多,包括激光功率 P 、电弧电流 I 、焊接速度 v 、激光-电弧距离 DLA 和坡口间隙 d 等,如何确定各参数对熔透的影响,并获得复合焊下“适度熔透”状态,对指导实际生产具有重要意义。

3.1 激光功率

不同间隙下激光功率对于焊缝的熔透状态起着不同的作用。如图 4 所示,在间隙较小($d=1$ mm)时,电弧电流 80 A,焊接速度 10 mm/s,随着激光功率的增加,焊缝背面熔宽增加,熔透状态从“未熔透”变到“适度熔透”;随着功率进一步增大,熔透状态变为“过熔透”。而在电弧电流为 140 A 时随着激光功率的增加熔透状态从“不稳定熔透”过渡到“适度熔透”再过渡到“过熔透”。也就是说,激光功率的增大意味着背面熔宽的增加。

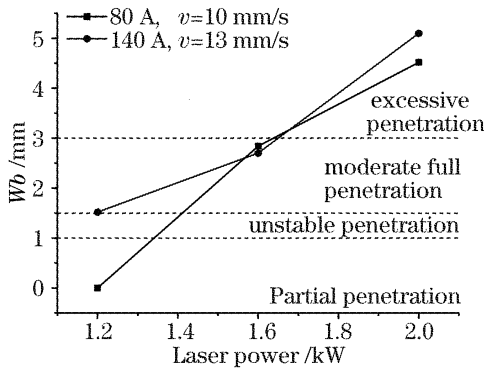


图 4 间隙 1 mm 时背面熔宽随激光功率的变化
Fig. 4 Variation of root width of weld with laser power for $d=1$ mm

间隙较大时,激光功率对熔透的影响不明显。如图 5 所示,间隙 $d=2$ mm 时,激光功率增加,背面熔宽 Wb 变化不大,熔透状态也没有改变。

分析原因,在坡口间隙较小($d \leq 1$ mm)时,电弧作用在工件上,形成一较大较浅的熔池,由于坡口间隙较小,液体金属并不能流淌至间隙下表面,因此,如果没有激光的作用,这时只能在间隙上方获得熔宽和较高的余高,背面熔宽很小甚至没有。加入激光以后,激光作用在电弧熔池上,由于很高的能量密度,激光作用点温度急剧升高,液体金属剧烈气化形成小孔,同时在激光作用点上方气化金属吸收激光能量形成等离子体,电弧被吸引聚集至小孔位置附近甚至部分电弧进入小孔,从而获得较大的熔深和

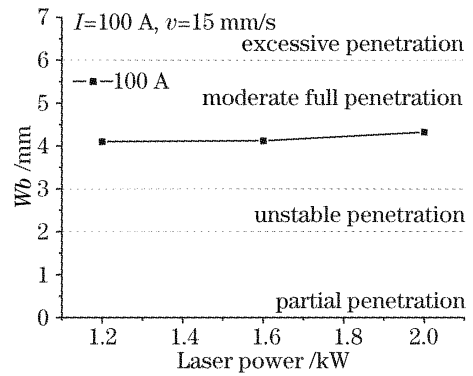


图 5 间隙 2 mm 时背面熔宽随激光功率的变化
Fig. 5 Variation of root width of weld with laser power for $d=2$ mm

背面熔宽。激光功率越大,则熔深越大,对电弧的吸引作用也越强,焊缝的熔深和背面熔宽就越大。而在坡口间隙较大时,即使激光功率比较小金属液体也可以较顺利地流淌至间隙下表面,从而在背面获得一定的熔宽和余高,因此激光功率的影响不是很明显。

3.2 电弧电流和焊接速度

如图 6 所示,焊接速度一定,电弧电流增大,背面熔宽增大。主要因为在相同的速度下,电流越大,焊丝和工件熔化量越多,被激光吸引和聚集的电弧也更多,因此能够获得更大的熔深和背面熔宽。激光功率为 1.2 kW,可以看到,在电弧电流为 0 时,即单激光焊接时,由于激光从间隙中漏掉,根本无法成形;随着电流增大,背面熔宽逐渐从 0 增大,熔透状态也从“未熔透”变化为“适度熔透”,“过渡熔透”。

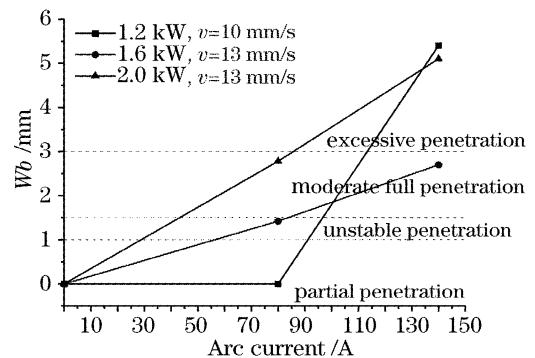


图 6 间隙 1 mm 时背面熔宽随电弧电流的变化
Fig. 6 Variation of root width of weld with arc current for $d=1$ mm

固定焊接电流,改变焊接速度,随着速度的增大,背面熔宽逐渐减小。图 7 所示,激光功率 2 kW,电弧电流 80 A,焊接速度从 10 mm/s 增加到 16 mm/s,熔透状态从“过熔透”变化到“适度熔透”,再到“不稳定熔透”。因为在焊接过程中,速度的增大意味着激光和电流的线能量密度同时减小,激光

小孔作用和对电弧的吸引、聚集作用也因此减弱,所以熔深下降,背面熔宽减小,熔透状态也从“过熔透”变化为“不稳定熔透”。因此,为了获得“适度熔透”,焊接速度不能太快,也不宜太慢。

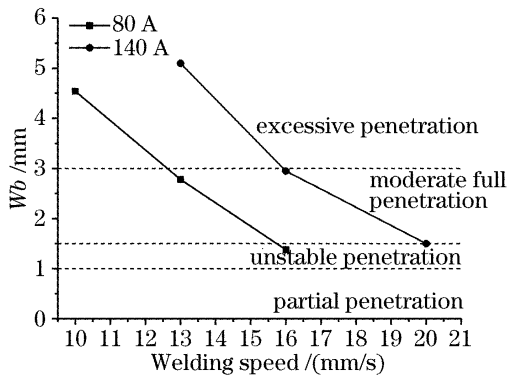


图7 间隙 1 mm 时背面熔宽随焊接速度的变化
Fig. 7 Variation of root width of weld with welding speed for $d=1\text{mm}$

3.3 激光-电弧距离

激光-电弧距离指的是激光中心轴与工件表面交点和电弧中心轴与工件表面交点之间的水平距离。

如图 8 所示,间隙 0.5 mm 时,激光-电弧距离取 0 和 2 mm,背面熔宽相差不大;但是当激光-电弧距离取 4 mm 时,背面熔宽较小。

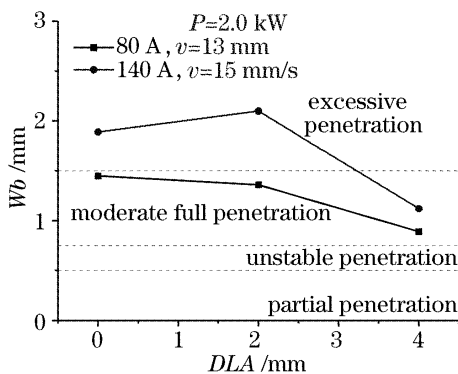


图8 间隙 0.5 mm 时背面熔宽随激光-电弧距离的变化
Fig. 8 Variation of root width of weld with distance of laser to arc for $d=0.5\text{mm}$

从图 9 中可以看出,在激光-电弧距离取 2 mm 时激光等离子体比激光-电弧距离取 4 mm 时的激光等离子体更大,说明激光-电弧距离取 2 mm 时的激光作用更加强烈,这可能是因为距离较近,电弧对激光的预热效果和支持作用更强导致^[5],所以熔透更厉害,激光-电弧距离取 2 mm 时的背面熔宽大于激光-电弧距离取 4 mm 时。

而在激光-电弧距离取 0 的时候,虽然它的背面熔宽与激光-电弧距离取 2 mm 时的相差不大,但是观察其焊缝背面发现背面熔宽不是太稳定,存在波

动(图 10),观察等离子体图像,对应此处的激光等离子体较暗,而且激光等离子体下半部分几乎消失,这有可能是由于激光-电弧距离太近,电弧熔滴正好过渡在激光小孔上方,干扰了激光作用,导致小孔瞬间关闭,熔透减弱,从而使得背面熔宽减小。

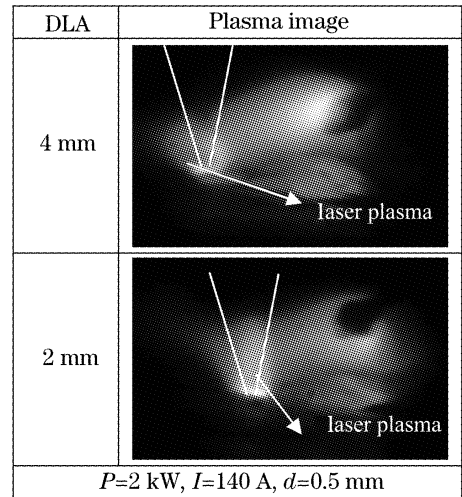


图9 不同激光-电弧距离下激光等离子体图像
Fig. 9 Laser plasma images for different distance of laser to arc

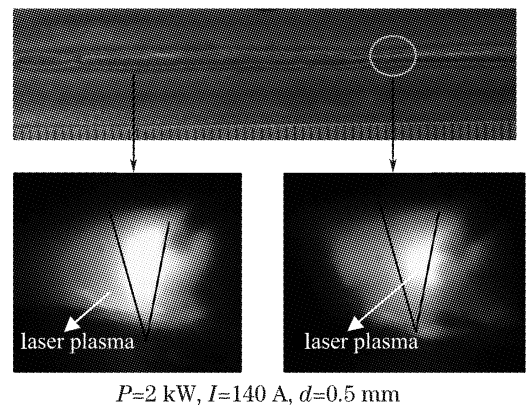


图10 激光-电弧距离取 0 时焊缝背面成形与激光等离子体的关系

Fig. 10 Effect of laser plasma upon root width of weld for distance of laser to arc is 0

在间隙较大($>1\text{mm}$)时,同样存在这个规律,但是需要注意的是,间隙较大,由于液体金属更容易朝间隙下方流淌,使得正面熔池长度相对要短,因此,在大间隙下复合焊的激光-电弧距离的适用范围相对更小。

4 结 论

在 CO₂ 激光-MIG 复合对接焊中,存在四种不同的熔透状态:“未熔透”,“不稳定熔透”,“适度熔透”和“过熔透”,其中“适度熔透”是最佳的熔透

状态。

激光功率、电弧电流和焊接速度适当,可以获得“适度熔透”。激光功率、电弧电流过小,焊接速度过大,产生“未熔透”或“不稳定熔透”;反之则“过熔透”。当间隙较小时,激光功率越大,背面熔宽越大;间隙较大时,激光功率对熔透状态的影响不大。

另外,激光-电弧距离对背面熔宽有一定影响,存在一最佳距离值。距离太大,背面熔宽变小;距离太小,影响焊缝背面成形的稳定性。

参 考 文 献

- 1 W. M. Steen, M. Eboo. Arc augmented laser welding [J]. *Metal Construction*, 1979, **11**(7): 332~335
- 2 T. Graf, H. Staufer. Laser-hybrid welding drives VW improvements [J]. *Welding J.*, 2003, **82**(1): 42~48
- 3 Claus Bagger, Flemming O. Olsen. Review of laser hybrid welding [J]. *J. Laser Application*, 2005, **17**(1): 2~14
- 4 Steve G. Shi, Paul Hilton, Steve Mulligan *et al.*. Hybrid Nd:YAG laser-MAG welding of thick section steel with adaptive control [C]. *Proc. ICALEO*, 2004. 25
- 5 Muneharu Kutsuna, Liang Chen. Interaction of both plasmas in CO₂ laser-MAG hybrid welding of carbon steel [C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 341~346