

文章编号: 1001-3806(2013)06-0781-05

激光-MIG 复合焊接 304 不锈钢工艺研究

郭亮¹, 王方¹, 张庆茂¹, 邓时累², 张健¹

(1. 华南师范大学 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广州 510006; 2. 深圳市大族激光科技股份有限公司 钣金装备事业部, 深圳 518103)

摘要: 为了研究 304 不锈钢光纤激光-MIG (metal inert-gas welding) 复合焊接性能, 采用正离焦的方法进行了大量的焊接实验。分析了送丝速率、弧长、激光功率、光丝距离、焊接方向和不同对接接头等参量对焊接成形的影响。结果表明, 在焊丝的干伸长度为 15mm、光丝距离为 2mm、采用前送丝时, 通过适当调节送丝速率、弧长可以实现较好的焊接效果; 小直径焊丝有利于形成较小熔宽和余高的焊缝, 而通过加入引弧板可以解决初始位置焊缝成形较差的问题。因此, 采用合适的激光-MIG 复合焊接工艺可以实现 304 不锈钢较好的焊接效果。

关键词: 激光技术; 激光-MIG 复合焊接; 焊接参量; 激光功率; 光丝距离; 对接接头; 焊缝形状**中图分类号:** TG456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.06.017

Research of techniques of laser-MIG hybrid welding of 304 stainless steel

GUO Liang¹, WANG Fang¹, ZHANG Qing-mao¹, DENG Shi-lei², ZHANG Jian¹

(1. Laboratory of Nano-photonic Functional Materials and Devices, South China Normal University, Guangzhou 510006, China; 2. Sheet Metal Equipment Division, Han's Laser Technology Co. Ltd, Shenzhen 518103, China)

Abstract: By adopting the positive defocusing amount, the effect of fiber laser-metal inert-gas welding (MIG) hybrid welding parameters on the weld morphology of 304 stainless steel, mainly including wire feeding speed, arc length, laser power, the distance between laser and MIG arc, welding direction and butt joint, was studied through many welding experiments. Results indicate that the good welding effects can be obtained by matching proper wire feeding speed and arc length when the extension length is 15mm and the distance between laser and MIG is 2mm. The results also show that small diameter wire will help to make the narrow weld width and low weld reinforcement, end tab will solve the problem of bad welding morphology at welding initial position. A conclusion is drawn that good welding quality of 304 stainless steel can be achieved when the proper welding procedure of laser-MIG hybrid welding is adopted.

Key words: laser technique; laser-MIG hybrid welding; welding parameters; laser power; distance between the laser and filler wire; butt joint; welding morphology

引 言

20 世纪 80 年代初, 英国学者 STEEN 首先提出了激光与电弧复合焊接 (metal inert-gas welding, MIG) 的概念^[1], 从此引发了各国研究机构开展激光-电弧复合热源焊接技术的研究热潮^[2-10]。激光-

电弧复合焊接兼有激光焊接和电弧焊接的优点, 与纯电弧焊接相比, 激光电弧复合焊接焊后变形小、熔深大, 明显提高焊接效率, 同时又可提高焊接装配间隙的适应性, 所以, 在焊缝成形的控制以及焊接间隙的容许误差两个方面具有明显的优势, 有着良好的综合经济性。

由于电弧和焊丝的引入, 使得焊接过程影响因素进一步增加, 有必要对其进行研究。本文中采用 10kW 高功率光纤激光与 MIG 复合焊接, 研究了不同工艺参量对 304 不锈钢焊缝成形形貌的影响。

1 试验设备、材料

1.1 试验设备

激光-MIG 复合焊焊接试验使用的 MIG 焊接电

基金项目: 国家八六三高技术研究发展计划资助项目 (2012AA040210); 中央财政支持地方高校专项资金资助项目 (510-C10293); 广东省教育厅学科建设专项基金资助项目 (CXZD1139)

作者简介: 郭亮 (1968-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事激光加工技术及装备的研究。

E-mail: 15323310190@163.com

收稿日期: 2013-02-25; 收到修改稿日期: 2013-04-17

机为 Panasonic 脉冲 MIG 半自动焊机,最大输出电流为 250A,焊接时与激光头一起固定在焊接机器人上。试验用的激光器为 YLS-10000 光纤激光器,最大焊接功率为 10kW。激光头聚焦焦距为 250mm,焦点处光斑直径为 0.3mm。试验装置如图 1 所示。

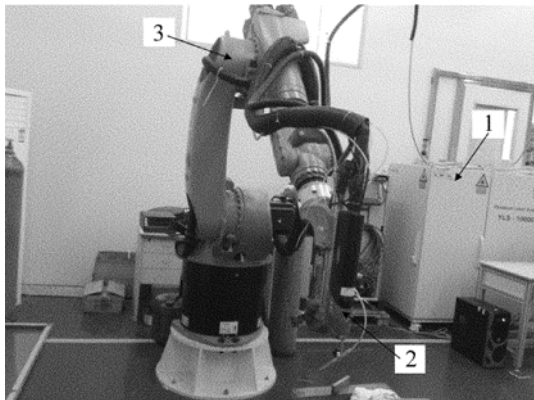


Fig. 1 main equipment, 1—YLS-10000 fiber laser; 2—Fronius welding machine; 3—KUKA60 robot

1.2 试验材料和方法

为了研究不同参量对复合焊接效果的影响,本实验中选用 304 不锈钢作为焊接材料,厚度为 3mm,为保证焊接强度,参照焊接手册标准选用与之适应的焊丝。

两热源采用旁轴复合,激光垂直焊接工件, MIG 焊枪与工件之间的交角为 45°。采用正离焦,离焦量为 3mm,设置焊丝干伸长度约 15mm,焊接过程采用纯度为 99.999% 的 Ar 保护。通过调节送丝速率、弧长、光丝距离、焊接方向和接头形式来研究其对复合焊接焊缝成形的影响。

2 实验结果及分析

在激光-MIG 复合焊接过程中,焊丝、激光束、母材及焊接方向之间的关系如图 2 所示。在图 2 中, d_1 为焦点与工件的距离; d_2 为焊丝与激光光斑中心的距离(光丝距离); d_3 为电极与母材表面之间的距离,决定了焊丝的干伸长度。

d_1 的大小决定了激光照射在母材表面光斑的

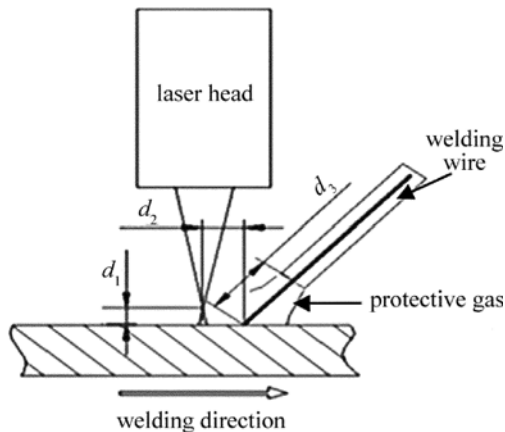


Fig. 2 Schematic diagram of laser-MIG hybrid welding

大小,一般情况下,在激光功率较小时通过采用负离焦来增加熔深,但是本实验中采用高功率光纤激光器,焦点处光斑较小,添加电弧后由于在激光的引导下电弧能够到达激光小孔,焦点处的能量密度进一步提高。如果继续采用负离焦,焦点处的高能密度全部用来熔化母材,将会形成大量的金属蒸汽,喷射出的金属蒸汽能够吸收激光能量,造成等离子体屏蔽激光,使焊接过程不稳定,反而使熔深减少。

d_3 距离过大,一方面会使送丝变得不稳定,另一方面会使电弧过长,易产生电弧摆动,出现烧边现象,使得焊接过程不稳定; d_3 距离过小,则焊接电弧太短,易形成短路,在焊接过程中所通过焊接电源的弧长修正进行微调,从而保证焊接的稳定性。

在进行材料的焊接时,首先需确定激光焊接深度的参量及电弧稳定焊接的参量,特别是电弧焊接的参量(包括送丝速率、弧长等),因为电弧稳定与否直接影响焊缝的外观。根据不同的工艺需求,还需研究激光与电弧熔池之间的位置关系(d_2 的大小),焊接方向和不同的焊接接头对焊接产生的影响。

2.1 送丝速率、弧长和激光功率对焊缝的影响

在进行复合焊接之前,需要先进行 MIG 焊接调试。焊丝进丝角度约 45°,焊接方向为后送丝,其它参量如表 1 所示。

Table 1 Initial testing parameters of MIG welding

welding wire and diameter/mm	laser power /W	welding speed /($m \cdot min^{-1}$)	feeding speed /($m \cdot min^{-1}$)	protective gas /($L \cdot min^{-1}$)	d_1 /mm	d_2 /mm	d_3 /mm
ER308/∅1.2mm	—	1.2	4	Ar/15	—	—	15

在上述初始参量的焊接过程中遇到的问题主要有:(1)电弧起弧不稳定、起始位置焊缝过高、收弧有弧坑等;(2)焊接过程飞溅大;(3)焊缝成形差,表

面粗糙、咬边、气孔等。
通过反复试验,发现处理如上问题主要在于起弧/收弧电流、送丝速率及弧长的设定。由于焊接过

程电弧采用一元化控制,即通过确定送丝速率来确定焊接电流及电压,要想提高焊接电流,则需提高送丝速率。在送丝速率较低时,由于焊接电流较低,焊接过程中熔滴过渡不稳定,熔滴不能形成稳定的射流过渡,所以焊接过程电弧不稳定,飞溅大。

同时,弧长对于焊接过程的稳定性也起到了重要作用,电弧过短则焊接时容易形成短路且飞溅大,造成不稳定;电弧过长,则容易形成断路,并且焊缝较宽、熔深较浅,无法实现高速焊接,通过调节焊机的弧长修正功能可实现弧长在一定范围内的修正(调节范围为 -30% ~ 30%),且调节过程可实现在线连续调节。

在初始试验参量焊接效果较差的情况下,通过改变焊接电流和激光功率来研究其对焊缝成形和熔深的影响,并进行一定的弧长修正及起弧和收弧控制,结果如图 3 所示。从图中可以看出,激光功率对熔深的比较大,基本呈线性关系。在适宜的条件下,复合焊的熔深大于激光焊合 MIG 焊熔深之和,主要因为其相互协同效果好,电弧挺度增强,熔宽增大。当焊接电流过大时,电弧等离子体对激光的屏蔽作用增强,熔深会受到影响。由此可见,激光和电弧复合焊的效果不仅仅是 1 + 1 = 2 的效果。

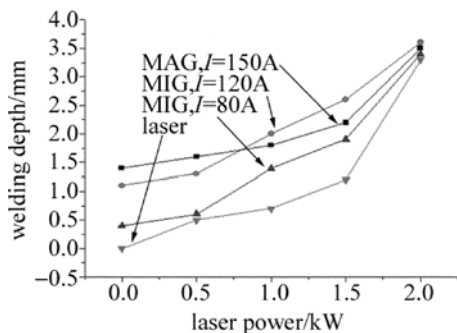


Fig. 3 Effect of laser power and welding current on welding depth

当焊接电流为 120A、送丝速率为 12m/min、功率为 1500W 时,焊接过程变得较为稳定且飞溅小、焊缝成形均匀,如图 4 所示。

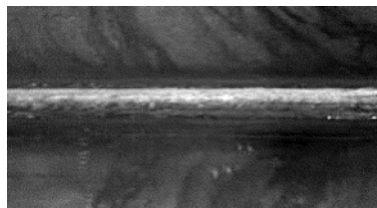


Fig. 4 The good bead geometry

2.2 光纤距离和焊接方向对焊缝成形的影响

d_2 (光纤距离)决定了电弧熔池与激光熔池两者之间的关系,为了得到最佳的焊接效率及表面成形,特别是在进行全透焊接时,控制 d_2 的大小很重要。激光与电弧之间的位置关系如图 5 所示。



Fig. 5 The distance between laser and arc

为了探究光纤距离 d_2 与激光位置对焊缝成形的影响,在 3mm 不锈钢上进行了实验研究,实验参量如表 2 所示,分别采用激光前置和激光后置在不同光纤距离下对焊缝熔深进行分析,结果如图 6 所示。从图中可以看出,无论是激光前置或者后置,复合焊接的熔深基本上在光纤距离为 2mm 时,取得最大值;在相同间距时,激光前置所获得的熔深略大于激光后置的熔深。这主要是因为激光具有深穿透功能,激光在前时,能量主要辐照在基材熔池上,有利于形成较大熔深。

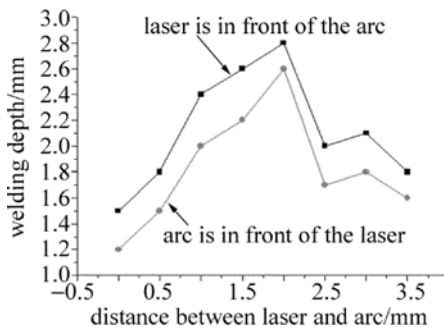


Fig. 6 Effect of welding direction and distance between laser and arc on the welding depth

Table 2 3mm 304 stainless steel welding parameters

welding wire and diameter/mm	laser power /W	welding speed / (m · min ⁻¹)	feeding speed / (m · min ⁻¹)	protective gas / (L · min ⁻¹)	d_1 /mm	d_2 /mm	d_3 /mm
ER308/∅1.2mm	1500	2	12	Ar/15	3	—	15

然而,在激光功率为 2kW、光纤距离为 2mm、其它参量如表 2 所示时,分别采用激光前置和激光后置进行熔透焊接实验。激光前置会出现焊缝下凹,背面出现熔滴的焊接效果,如图 7 所示。通过调整光纤距离至 10mm,仍然无法解决上述问题。主要

原因在于,激光在前时,先进行了一次穿透焊接,紧随其后的电弧热输入较大,且填充金属较多,熔池金属没有承重母材(尤其是在光纤距离较小时),造成焊缝下陷,背面下漏。通过改变焊接方向,即前送丝焊接(电弧在前,激光在后),获得了正面饱满、背面

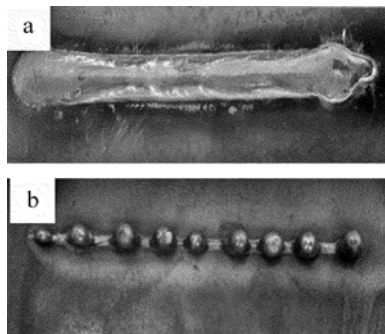


Fig. 7 The front and back morphology of welding joint when laser is in front of the arc

a—the front morphology b—the back morphology

均匀的焊缝成形,如图8所示。因此,在选择焊接方向时要根据是否熔透来选择焊接的方向。

2.3 对接接头对焊缝形貌的影响

为了研究不同焊接接头对复合焊接的影响,在相同的工艺参量(如表3所示)下分别对3mm不锈钢进行了拼焊和角焊实验。焊缝形貌如图9和图10所示。

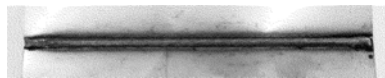


Fig. 9 The initial welding morphology of tailor welding

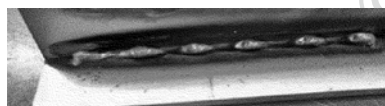


Fig. 10 The initial welding morphology of fillet welding

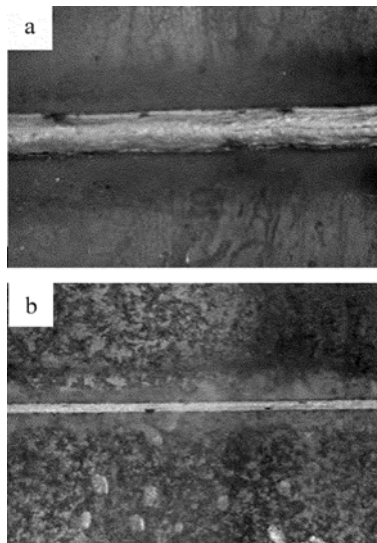


Fig. 8 The front and back morphology of welding joint when arc is in front of the laser

a—the front morphology b—the back morphology

Table 3 The initial welding parameters of 304 stainless steel

welding wire and diameter/mm	laser power /W	welding speed / $(m \cdot min^{-1})$	feeding speed / $(m \cdot min^{-1})$	protective gas / $(L \cdot min^{-1})$	d_1 /mm	d_2 /mm	d_3 /mm
ER308/ $\varnothing 1.0$ mm	1200	1.2	7	Ar/15	3	2	15

可以看出,在相同参量下拼焊焊缝成形良好,而角焊时焊缝却极不平整,出现驼峰。这主要与熔滴过渡时电弧的不稳定有关,经过反复试验发现,在进行角焊时,由于两侧母材对电弧具有干扰作用,电弧摆动较大造成焊缝成形不平整。通过调节弧长修正,减小电弧的长度(电弧变硬)后,焊接过程变得稳定,同时降低焊接速度,获得了良好的焊缝成形,焊接参量(见表4)及焊接成形如图11和图12所示。

Table 4 Revised welding parameters

welding wire and diameter/mm	laser power /W	welding speed / $(m \cdot min^{-1})$	feeding speed / $(m \cdot min^{-1})$	protective gas / $(L \cdot min^{-1})$	d_1 /mm	d_2 /mm	d_3 /mm
ER308/ $\varnothing 1.0$ mm	1000	0.8	8	Ar/15	3	2	15

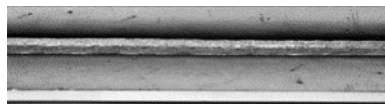


Fig. 11 Welding morphology of tailor welding after revising the welding parameters

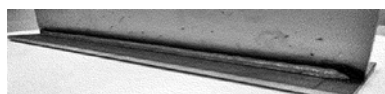


Fig. 12 Welding morphology of fillet welding after revising the welding parameters

2.4 其它影响因素

在焊丝直径的选择上,小直径焊丝焊接时临界电流(熔滴形成射流过渡时的电流)较低,在相同的送丝速率下焊接电流较小,热输入较小,同时焊缝的填充金属也较少,更易获得较小缝宽及余高的焊缝形貌。在焊接速度较慢的情况下,同时为保证达到临界焊接电流,又必须保证较快的送丝速率,在这种情况下宜选用小直径焊丝,便于控制焊缝的高度。

焊接起始位置的成形控制也是焊接过程的一个难点,一方面是焊接起始位置焊缝的高度控制,另一

方面是焊接起始位置背面下漏控制。焊接起始位置问题的出现主要原因在于起步时机器人运动速度较慢和电弧电流不稳定,处理起始位置焊缝过高的问题主要是通过控制焊接起始电流及过渡时间。处理起始位置熔滴下漏的问题必须设置激光起始等待时间,但这种方式造成起始一段未焊透的情况,所以必须结合实际情况进行选择。引弧板是为了解决焊接初期的缺陷而设计的工件之外的小板块,可以从引弧板上开始焊接,从而将焊接起始位置的缺陷置于工件之外,保证整个工件焊缝成形良好。

3 结 论

(1)在 MIG 初始焊接调试时,送丝速率过小造成成形较差。在焊丝的干伸长度为 15mm、光丝距离为 2mm 时,通过将送丝速率由 4m/min 提高至 12m/min,并进行一定的弧长修正及起弧收弧控制,最终实现电弧稳定。

(2)复合焊接过程中焊接的方向极为重要,在进行熔透焊接时,宜采用前送丝,并优化其它工艺参量,可以形成正面饱满、背面均匀的焊缝形貌。

(3)角焊时,由于两侧的母材对电弧具有干扰作用,电弧摆动较大造成焊缝成形不平整,可以通过减小弧长来进行调节。

(4)在相同的送丝速率下,小直径焊丝更容易获得较小缝宽及余高的焊缝形貌。在必要情况下,可以在焊缝起始位置的前端放置引弧板来解决初始

位置焊缝成形较差的问题。

参 考 文 献

- [1] STEEN W M. Arc augmented laser processing of materials [J]. Journal of Application Physics, 1980, 51(11): 5636-5641.
- [2] MATSUDA J, UTSUMI A. TIG or MIG augmented laser welding of thick mild steel plate [J]. Joining & Material, 1988, 7(1): 31-34.
- [3] MAHRIE A, BEYER E. Hybrid laser beam welding-classification characteristics and applications [J]. Journal of Laser Applications, 2006, 18(3): 169-180.
- [4] TAN B, LIU W H, CHEN G M, *et al.* Laser-MIG hybrid welding deformation simulation of corner joint of aluminum alloy based on SYSWELD [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2011, 34(4): 52-56 (in Chinese).
- [5] HU B, OUDEN G D. Synergetic effects of hybrid laser/arc welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(4): 427-431.
- [6] BAGGER C, OLSEN F O. Review of laser hybrid welding [J]. Journal of Laser Applications, 2005, 17(1): 2-14.
- [7] CAMPANA G, ASCARI A, FORTUNATO A, *et al.* Hybrid laser-MIG welding of aluminum alloys: the influence of shielding gases [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(10): 5588-5590.
- [8] MA Zh H, CHEN D G, LI N, *et al.* Analysis of porosity characteristics of 5052 aluminum alloy welded by hybrid CO₂ laser-MIG welding [J]. Laser Technology, 2012, 36(6): 780-782 (in Chinese).
- [9] TAN B, MA B, ZHANG L J, *et al.* Microstructure and properties of welding joints of aluminium alloy with medium thickness by the laser-MIG hybrid welding [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(5): 17-21 (in Chinese).
- [10] CUI L, HE D Y, LI X Y, *et al.* Research progress of laser-arc hybrid welding processing parameters [J]. Laser Technology, 2011, 35(1): 65-69 (in Chinese).