

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0279-05

热源空间位置对激光-电弧复合焊接焊缝成形的影响

高 明, 曾晓雁, 胡乾午, 严 军

(武汉光电国家实验室(筹)激光部, 华中科技大学激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要 在激光-电弧复合焊接中, 热源空间位置关系, 如热源间距、激光离焦量、焊炬倾角 等对激光、电弧之间的协同效应具有至关重要的作用, 但是目前对此缺乏系统的专题研究。为此, 采用 5 kW CO₂ 快轴流激光器和 MAG (metal active gas) 焊机对 7 mm Q235 钢板进行了激光-电弧复合焊接工艺研究, 集中探讨了空间位置参数对焊缝成形的影响规律。结果表明, 热源空间位置参数对复合焊接焊缝成形具有显著影响, 只有在合理的参数组合下才能够获得理想的焊缝质量。其中, 热源间距对熔深的影响最大, 不同间距处的熔深增幅高达 55%, 焊丝干伸长和离焦量对焊接熔深也具有较强的影响。焊接熔宽则对焊炬倾角和焊丝干伸长的变化更为敏感。上述参数主要通过改变激光-电弧等离子体相互作用、热源能量叠加状态和熔池受力状况来决定焊缝成形。

关键词 激光技术; 激光焊接; 复合焊接; 空间位置; 焊缝成形; 焊接熔深

中图分类号 TG456.9 **文献标识码** A

Effects of Heat Sources Arrangement on Weld Shape of Laser-Arc Hybrid Welding

GAO Ming, ZENG Xiao-yan, HU Qian-wu, YAN Jun

(Division of Laser Science and Technology, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, National Engineering Research Center for Laser Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The heat sources arrangement is very significant for the laser-arc synergetic effects of hybrid welding, but there have been few researches about this. So a detail study of laser-arc hybrid welding process was carried out on the 7 mm mild steel by together a 5 kW CO₂ laser with a MAG (metal active gas) welder. The results show that the heat sources arrangement parameters, such as heat sources distance, laser defocused distance, angle of weld torch, etc, have obviously effect on the weld shape, and the good weld shape was obtained only with the appropriate parameter combination. The increment of weld penetration depth caused by heat sources distance is the most, which is 55%, and the effects of wire stick-out and laser defocused distance on the weld depth are also stronger. The weld width is more sensitive to the wire stick-out and the angle of weld torch. The effects of these parameters are achieved by the interaction of three mechanisms: the change of laser-arc plasma interaction, the add state of the two heat sources and the state of the forces on the weld pool.

Key words laser technique; laser welding; hybrid welding; arrangement; weld shape; weld penetration depth

1 引 言

激光-电弧复合焊接通过两热源之间的相互作用, 弥补了单热源焊接工艺的不足, 结合两种热源的优势, 具有焊接熔深大、加工速度快、工件变形小、熔池搭桥能力强、能够焊接高反射率材料等特点^[1~6]。近年来激光-电弧复合焊接已经成为焊接领域的重点研究技术之一, 在汽车、石油、船舶、压力容器等领

域已得到工业应用^[7~9]。

因为激光和电弧两种不同焊接热源的集成, 激光-电弧复合焊接工艺具有一些热源空间位置参数, 比如热源间距、焊炬倾角、激光离焦距离等。已有研究成果表明, 这些空间位置参数对激光和电弧之间的协同效应具有至关重要的作用, 能够决定两热源的有效耦合程度, 并最终影响复合焊接的工艺特性

作者简介: 高 明(1975—), 男, 湖北人, 博士研究生, 主要从事激光先进制造技术的研究。E-mail: hust_gm@163.com

导师简介: 曾晓雁(1962—), 男, 湖南人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光先进制造技术的研究。

E-mail: xyzeng@mail.hust.edu.cn

和接头成形质量。但是,出于缺乏系统的研究工作,目前从已有的激光-电弧复合焊接工艺研究中只能获取零星的相关信息。本文采用 5 kW CO₂ 快轴流激光器和脉冲 MAG 焊机在 7 mm 厚 Q235 钢板上进行了激光-电弧复合焊接的系列实验,旨在探讨热源空间位置参数对焊缝成形的影响规律。

2 实验装置及方法

采用德国 Rofin Sinar TR050 5 kW 快轴流 CO₂ 激光器和 Panasonic 脉冲 MAG 焊机,通过自行研制的复合焊接装置进行旁轴复合,如图 1 所示。激光光束模式为 TEM₀₁,整个光路经四块平面反射镜后反射聚焦镜,聚焦距离为 286.5 mm,光斑直径为 0.6 mm。MAG 焊机采用直流反接。

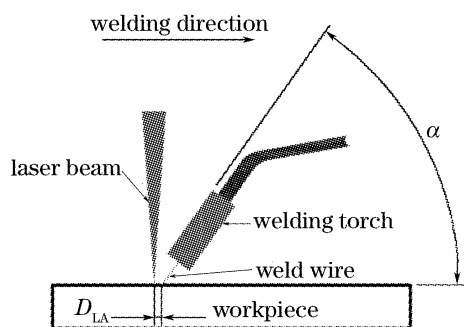


图 1 CO₂激光-MAG 复合焊接示意图

Fig. 1 Schematic setup of CO₂ laser-MAG hybrid welding

实验材料为 7 mm 厚 Q235 钢板,尺寸 100 mm × 50 mm。焊丝为直径 1 mm 的神钢 MG-51T。采用的工艺参数及其变化范围如表 1 所示。此外,本文约定:电弧作用在熔池前端,即图 1 所示焊接方向时,称之为电弧引导焊,表示为 MAG-Laser;反之则为激光引导焊,表示为 Laser-MAG。

表 1 实验采用的焊接参数

Table 1 Welding parameters for experiment

Laser power, P /kW	4 or 4.5
TIG current, I /A	150 or 180
Distance between laser axis and arc root, D_{LA} /mm	1~6
Wire stick-out, l /mm	8~16
Angle of welding torch, α /($^{\circ}$)	45~60
Laser defocused distance, ΔF /mm	-3~3
Welding speed, v /(m/min)	0.8

3 实验结果

3.1 复合焊接的焊缝成形

图 2 为典型的激光-电弧复合焊接焊缝形貌。

根据激光焊接和常规电弧焊接的焊缝形貌特征,可以将其分为电弧区和激光区。显然,焊缝上半部分宽大的电弧区表明电弧主要作用在焊接熔池上半部分,这说明复合焊接熔宽主要取决于电弧的作用范围和强度;而焊缝下半部分明显的激光深熔焊特征则说明复合焊接熔深的大小主要决定于激光小孔效应的强弱,这些现象在 Rayes 等^[10]的研究中也得到了很好的验证。

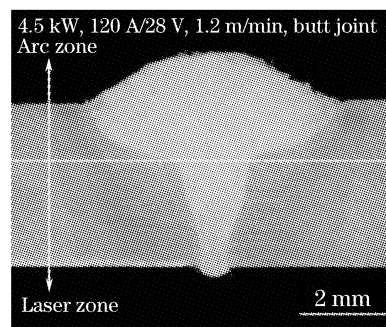


图 2 复合焊接焊缝不同区域的命名

Fig. 2 Nomenclature for the different zones of hybrid weld

由此可知,热源空间位置的变化将改变激光和电弧在工件表面的能量分布和熔池受力状况,进而改变激光小孔效应、电弧的作用区域与强度,最终影响复合焊接焊缝成形。

3.2 热源位置参数对焊缝成形的影响

3.2.1 焊接方向和热源间距(D_{LA})的影响

如图 3(a)所示,无论 MAG-Laser 还是 Laser-MAG,都存在一个获得最大焊接熔深的 D_{LA} 。其中,MAG-Laser 在 $D_{LA} = 2$ mm 时得到最大熔深 7.0 mm,随后逐步下降,至 $D_{LA} = 7$ mm 时,熔深已经接近单独激光焊接熔深,达不到复合的效果;Laser-MAG 则在 $D_{LA} = 1$ mm 得到最大熔深 6.3 mm。此外, MAG-Laser 在 D_{LA} 为 1~2 mm 的较宽范围内都能够获得理想的大复合焊接熔深,而 Laser-MAG 仅在 D_{LA} 为 1 mm 时具有大的熔深。图 3(b)则表明因为总输入热量的增加,无论何种焊接方向,复合焊接熔宽都大于单热源焊接熔宽。总的来说,焊接参数相同的情况下, MAG-Laser 能够获得更大的熔深和更小的焊缝宽度。

在复合焊接过程中,随着 D_{LA} 的增加,激光和电弧等离子体逐步分离,两者之间的协同作用逐步减弱^[11];另一方面,保护气体由喷嘴至熔池的距离增加,对熔池的保护作用和激光等离子体膨胀的抑制能力也开始减弱,从而降低了工件的激光吸收率和激光小孔的穿透深度。对于 MAG-Laser,由于 MAG 电弧首先作用于工件表面,其预热作用较强,

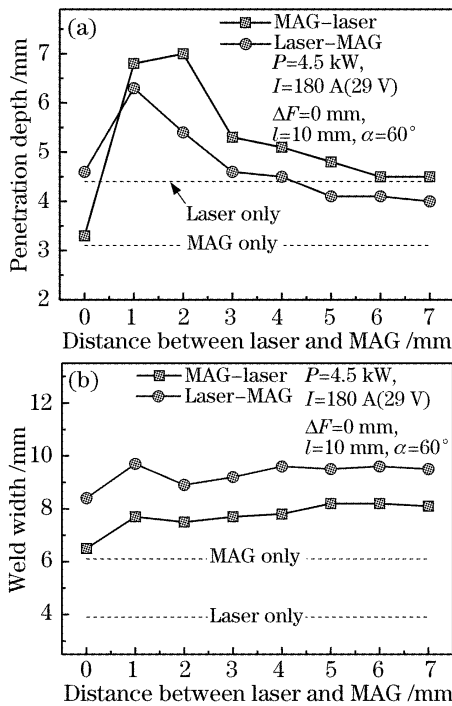


图3 热源间距和焊接方向对焊接熔深(a)及焊缝宽度(b)的影响

Fig. 3 Effects of D_{LA} and welding direction on weld

penetration depth (a) and weld width (b) of hybrid welding
 即使在 D_{LA} 达到 7 mm, 复合焊接熔深仍然略大于单独激光焊接熔深。反观 Laser-MAG, 因为 MAG 电弧作用于激光作用点后端, 其预热作用基本消失, 保护气体对激光等离子体的抑制作用的恶化导致激光小孔效应减弱, 复合焊接熔深甚至低于单独激光焊接熔深。另外, 当 $D_{LA} = 0$ mm 时, 因为激光直接作用在焊丝上, 部分能量用于焊丝的熔化, 导致激光能量散失严重, 小孔效应减弱, 焊接熔深急剧降低。

通过图 4 中不同焊接方向的焊缝形貌可以看到, MAG-Laser 具有更明显的激光“小孔”特征, 电弧区和激光区界线更为分明。这是因为在 MAG 电弧引导焊中, 激光直接作用在电弧力后排熔池金属

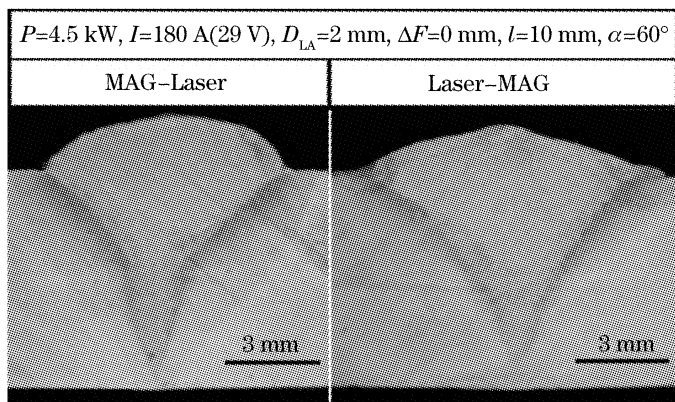


图4 不同焊接方向的复合焊缝形貌

Fig. 4 Hybrid weld morphology with different welding direction

后下凹的液态或固态高温金属上, 具有很强的预热作用, 大大增强了激光的小孔效应, 从而获得了更大的焊接熔深。在 Laser-MAG 焊接时, MAG 焊炬处于前倾焊方位, 电弧力后排熔池金属的作用减弱, 熔池底部液体金属增厚, 这导致激光在工件上的起始作用面增高; 另一方面, 电弧对激光作用点前方的工件预热作用有限, 这导致激光小孔效应减弱, 这样更多的能量集中熔池的上部, 从而具有更大焊缝宽度。

3.2.2 激光离焦量的影响

如图 5 所示, 焊接熔深在离焦量 (ΔF) 为 -1 mm 和 0 mm 时得到最大值; 熔宽则在离焦量为 0 时得到最小值, 但是, ΔF 对焊接熔深的影响更大: $\Delta F > 0$ 后, 熔深开始急剧下降。在激光焊接中, 离焦量会改变激光束在工件表面的光斑直径, 这对激光在工件表面的能量分布有直接影响, 将改变激光小孔效应的强度。通常离焦量在 -1 mm 左右时能够获得最大的焊接熔深^[12]。图 5 所示的规律与此能够很好地吻合。这同样说明在复合焊接过程中, 激光能量密度的改变对焊接熔深具有更重要意义。

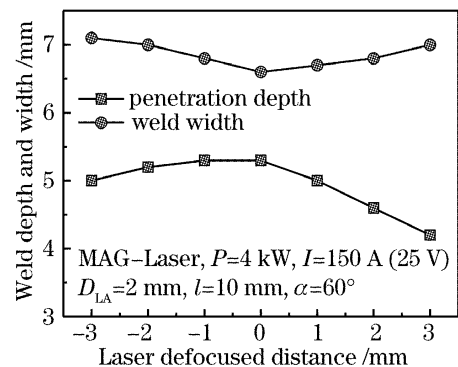


图5 离焦距离对焊接熔深和熔宽的影响

Fig. 5 Effects of defocused distance of laser on penetration depth and bead width of hybrid welding

3.2.3 焊丝干伸长的影响

如图 6 所示, 焊丝干伸长 l 越小, 焊接熔深越大, 焊缝宽度越小。这是因为随着焊丝干伸长的增加, 电弧电压升高, 电弧力减弱, 焊丝熔化量增加。从而, 电弧形成的液态金属凹坑变浅, 激光作用平面提高, 而电弧的作用范围增加, 导致熔宽增加, 熔深降低。

实验过程中发现, 焊丝干伸长越大, 焊接飞溅越大, 工艺稳定性下降。如图 7 所示, 焊丝干伸长增加到 16 mm 时, 焊缝中开始出现大量气孔, 至 18 mm 时, 焊缝表面形貌开始急剧恶化, 表面有坑洞出现, 焊缝边缘也不再平直。这是因为, 保护气体由喷嘴至熔池的距离增加, 对熔池的保护作用及抑制激光

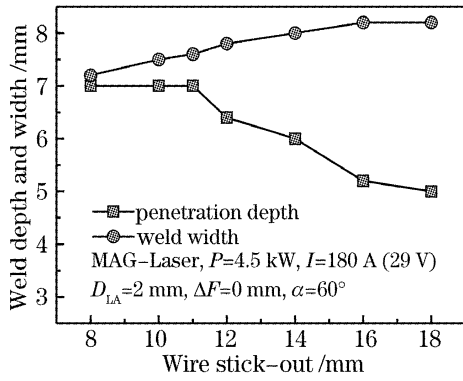


图 6 焊丝干伸长对焊接熔深和熔宽的影响

Fig. 6 Effects of wire stick-out on penetration depth and bead width of hybrid welding

等离子体屏蔽作用的能力也相对减弱,这样,熔滴行进过程中卷入气体并在进入熔池时发生爆炸,飞溅的急剧增加和电弧稳定性急剧下降。此外,电弧根部作用范围的扩散和熔滴进入熔池行程的增加导致电弧能量密度减低、能量散失增加,使得熔池持续时间减少,再加上电弧力搅拌作用的减弱,熔池内气体不能完全逸出,导致焊缝形貌恶化。因此,过大的焊丝干伸长量不利于复合焊接的工艺稳定性和良好的焊缝成形。

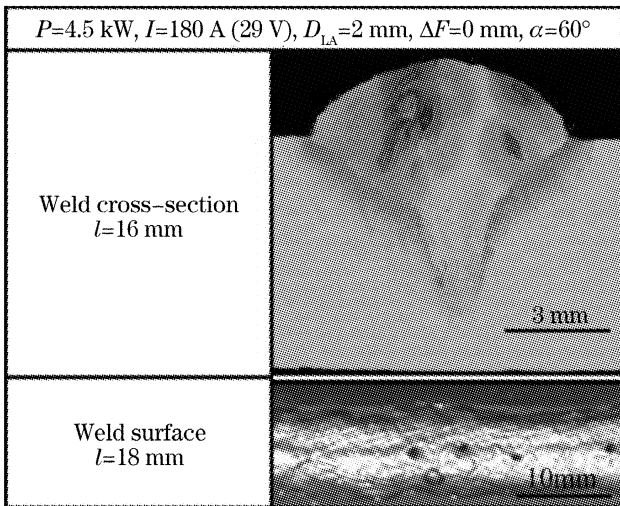


图 7 不同焊丝干伸长下的焊缝形貌

Fig. 7 Pores in hybrid weld with different wire stick-out

3.2.4 焊炬倾角的影响

如图 8 所示(受到复合焊接装置的限制,本实验中可调节的最大焊炬倾角为 60°),焊炬倾角 α 越大,熔深越大。同时通过试验观测发现,随着 α 的增大,焊接过程更加稳定,飞溅变小。这是因为,随着焊炬倾角的增大,电弧根部得到收缩,稳定性增强,指向熔池底部的电弧压力和能量更加集中,能够形成更深的电弧凹坑并提高电弧能量的利用率,提供更强

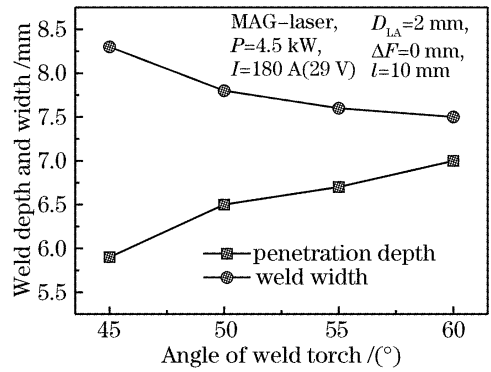


图 8 MAG 焊炬倾角对复合焊接熔深和熔宽的影响

Fig. 8 Effects of angle of MAG torch on penetration depth and bead width of hybrid welding

3.3 结果讨论

通过前面的分析可知,只有在合理的空间位置参数组合下才能够获得增强的焊接熔深,得到理想的焊缝深宽比,减少焊缝缺陷。表 2 为不同参数下复合焊接熔深和熔宽的增幅百分比(因为 $D_{LA} = 0$ 时,热源能量通过飞溅大量散失,造成焊缝形貌的突变,在此不予考虑)。显然,热源间距对熔深的影响最大,不同间距处的熔深增幅高达 55%,焊丝干伸长和离焦量对焊接熔深也具有较强的影响,而焊接熔宽对焊炬倾角和焊丝干伸长的变化更为敏感。

表 2 不同参数下熔深和熔宽增量百分比

Table 2 Incremental percent of weld depth and width with different parameters

Parameters	Depth / %	Width / %
D_{LA} (Laser-MAG)	55.0	9.3
D_{LA} (MAG-Laser)	37.0	8.9
ΔF	26.2	6.1
l	34.6	13.9
α	18.6	10.7

热源空间位置参数主要通过以下三种机制的相互作用来实现复合焊接焊缝成形的变化:1) 改变两热源在工件上的直接叠加状态,改变其能量分布状态;2) 影响激光、电弧之间的等离子体相互作用,改变激光对电弧的压缩程度和激光小孔效应的强度,进而改变热源间的协同效应;3) 影响焊接熔池的受力状况。不同位置参数的主要影响机理各不相同,其中,热源间距主要改变激光、电弧之间的等离子体相互作用程度;离焦量倾向于改变激光的能量分布状况,焊丝干伸长和焊炬倾角则主要影响熔池受力状况和电弧能量分布状况。

4 结 论

1) 热源空间位置参数对复合焊接焊缝成形具

有显著影响,只有在合理的参数组合下才能够获得理想的焊缝成形。其中,热源间距对熔深的影响最大,不同间距处的熔深增幅高达 55%,焊丝干伸长和离焦量对焊接熔深也具有较强的影响。焊缝宽度对焊炬倾角和焊丝干伸长的变化更为敏感。

2) 电弧引导焊(MAG-Laser)能够取得更大的焊接熔深和更小的焊接熔宽,更有利于发挥复合焊接的优势,其热源间距在 1~2 mm 范围内能够取得理想的焊缝成形。

3) 焊丝干伸长过大会导致工艺稳定性降低,在焊缝内形成气孔等缺陷,不利于形成良好的焊缝成形。

4) 热源空间位置参数主要通过改变激光-电弧等离子体相互作用、热源能量叠加状态和熔池受力状况来决定焊缝成形。

参 考 文 献

- 1 Claus Bagger, Flemming O. Olsen. Review of laser hybrid welding [J]. *J. Laser Applications*, 2005, **1**(17): 2~14
 - 2 J. Tusek, M. Suban. Hybrid welding with arc and laser beam [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 1999, **4**(5): 308~311
 - 3 Gao Ming, Zeng Xiaoyan, Yan Jun. State and development of laser-arc hybrid welding technology [J]. *China Welding Industry*, 2005, **2**: 1~6
- 高明,曾晓雁,严军. 激光-电弧复合焊接技术的研究现状及

- 发展 [J]. *中国焊接产业*, 2005, **2**: 1~6
- 4 Shigeki Fujinaga, Ryoji Ohashi, Seiji Katayama. Improvements of welding characteristics of aluminum alloys with YAG laser and TIG arc hybrid system [C]. *SPIE*, 2002, **4831**: 301~306
 - 5 Satoru Uchiumi, Jing-bo Wang, Seiji Katayama *et al.*. Penetration and welding phenomena in YAG laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy [C]. *Proceedings of ICALEO 2004*, San Francisco, California; LIA, 2004. Hybrid Laser Welding: 76~85
 - 6 Liu Liming, Wang Jifeng, Song Gang. Hybrid laser-arc welding of AZ31B Mg alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1523~1526
 - 刘黎明,王继锋,宋刚. 激光电弧复合焊接 AZ31B 镁合金 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1523~1526
 - 7 Claus Bagger, Lars de Sondrup, Flemming Ove Olsen. Laser/TIG hybrid welding of pot for induction heater [C]. *Proceedings of ICALEO 2004*. San Francisco, California; LIA, 2004. Hybrid Laser Welding: 60~69
 - 8 T. Graf, H. Staufer. Laser hybrid process at volkswagen [J]. *IIV - DOC*, **XII**-1730-02
 - 9 S. Kaierle, K. Bongard, M. Dahmen *et al.*. Innovative hybrid welding process in an industrial application [C]. *ICALEO*, Orlando; LIA, 2000, Section C: 91~98
 - 10 M. EL Rayes, C. Walz, G. Sepold. The influence of various hybrid welding parameters on bead geometry [J]. *Welding Journal*, 2004, **5**: 147s~153s
 - 11 M. Gao, X. Y. Zeng, Q. W. Hu. Effects of welding parameters on melting energy of CO₂ laser-GMA hybrid welding [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, **11**(5): 517~522
 - 12 Yan Yuhe, Zhong Minlin. High Power Laser Processing and Its Application [M]. Tianjin; Tianjin Science and Technology Press, 1994. 215~216
- 闫毓禾,钟敏霖. 高功率激光加工及其应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1994. 215~216