

激光-电弧复合焊焊缝合金元素分布的研究

赵琳¹ 塚本进² 荒金吾郎² 张岩¹ 田志凌³

¹中国钢研科技集团有限公司, 新冶高科技集团有限公司, 北京 100081

²物质·材料研究机构, 筑波 305-0047

³中国钢研科技集团有限公司, 北京 100081

摘要 激光-电弧复合焊接相对激光焊接的优势之一是通过焊接材料的添加, 调整焊缝的合金元素成分, 改善焊缝组织与性能。焊接材料添加的合金元素在焊缝中的均匀分布是体现激光-电弧复合焊接这一优势的关键。然而, 对于窄而深的激光-电弧复合焊焊缝, 实现合金元素的均匀分布是非常困难的。研究了焊接工艺参数对CO₂激光-熔化极气体保护(GMA)复合焊焊缝合金元素分布的影响规律, 并讨论了熔池流动行为与合金元素分布均匀性的关系。结果表明, 随着焊接速度的减小, CO₂激光-GMA复合焊焊缝合金元素的分布趋向于均匀分布; 随着坡口间隙的增大, 焊缝合金元素均匀程度越高。焊接方向为激光在前时, 激光-电弧复合焊接熔池流动为内向流动时(即熔池表面从熔池后部向小孔流动, 并且小孔后沿液体向下流动), 焊缝合金元素分布较均匀, 其均匀性高于焊接方向为电弧在前时的情况。焊接方向对焊缝合金元素分布的影响规律主要取决于电弧拖拽力和熔滴对熔池冲击力的方向。当焊接方向为激光在前时, 电弧拖拽力和熔滴对熔池冲击力指向小孔方向, 促进了熔池内向流动。

关键词 激光光学; 激光-电弧复合焊; 合金元素分布; 焊接速度; 焊接方向; 熔池流动

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0406006

Distribution of Wire Feeding Elements in Laser-arc Hybrid Welds

Zhao Lin¹ Tsukamoto Susumu² Arakane Goro² Zhang Yan¹ Tian Zhiling³

¹New Metallurgy Hi-Tech Group Co.Ltd., China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China

²National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047, Japan

³China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China

Abstract Compared with laser welding, laser-arc hybrid welding has a lot of advantages. One of these advantages is to improve the weld metal microstructure and mechanical properties by feeding welding materials. In this case, it is essential to achieve the homogeneous distribution of alloying elements. In deep and narrow hybrid welds, however, it is very difficult to attain the homogeneous distribution. The effect of welding parameters on the distribution of wire feeding elements is investigated during CO₂ laser and gas metal arc (GMA) hybrid welding process, and the influence of fluid flow behaviour on the homogeneity of weld metal is also discussed. The results indicate that the homogeneity of weld metal is improved when decreasing the welding speed or increasing the gap width. When the welding direction is leading laser, the molten metal flows from the rear end to the keyhole on the pool surface and then goes down just behind the keyhole during hybrid welding, namely inward flow, resulting in almost homogeneous distribution of alloying elements. The distribution of alloying elements is more homogeneous in leading laser compared with leading arc, since both of the drag force of the plasma jet and momentum of droplet direct to the keyhole, promoting the inward flow in leading laser.

Key words laser optics; laser-arc hybrid welding; distribution of alloying elements; welding speed; welding direction; fluid flow

OCIS codes 140.3390; 110.7440; 160.3900; 350.3850

收稿日期: 2014-11-14; 收到修改稿日期: 2014-12-13

作者简介: 赵琳(1977—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事激光加工技术和焊接技术等方面的研究。

E-mail: hhnds@aliyun.com

1 引 言

激光-电弧复合焊接是将激光和电弧这两种不同的热源耦合共同作用于同一区域。相对单一热源,激光-电弧复合焊接具有熔深大、速度快、稳定性高、允许的坡口间隙大以及气孔少等特点,在汽车、造船、桥梁、起重机械等领域得到了越来越广泛的应用^[1-6]。

作为激光焊接的重要补充和发展,激光-电弧复合焊接相对激光焊接的优势之一是通过焊接材料的添加,调整焊缝的合金元素成分,改善焊缝组织与性能^[7]。焊接材料添加的合金元素在焊缝中的均匀分布是体现激光-电弧复合焊接这一优势的关键。然而,对于窄而深的激光-电弧复合焊焊缝,尤其是大板厚焊接结构条件下,实现合金元素的均匀分布是非常困难的。目前,激光-电弧复合焊接焊缝合金元素均匀化得到了越来越多的关注,但相关的研究结果较少^[8-10]。其中,Liu等^[9]利用CO₂激光-MAG复合焊焊接了600 MPa级高强度钢,对焊接接头组织和性能进行了研究。他们发现,焊缝上部Mo、Mn元素的含量远高于焊缝下部,合金元素的分布不均匀。而且,此研究中所采用的激光功率为2.4 kW,焊缝熔深约为4 mm,在这样的情况下获得均匀化的焊缝尚且较困难,可知对于中厚板激光-电弧复合焊接,熔深超过10 mm,焊缝中合金元素的均匀化分布将更为困难。另外,Leimser等^[10]采用附加磁场的方法“搅拌”熔池,促进了激光焊接熔池流动。尽管随着励磁电流的增大,激光焊缝中Si元素均匀化程度有所提高,但其仍存在明显偏析现象,并没有获得合金元素的均匀分布。由上可知,实现激光-电弧复合焊焊缝合金元素的均匀化需要进行深入的研究和分析。

因此,本文研究了焊接工艺参数对CO₂激光-熔化极气体保护(GMA)复合焊焊缝合金元素分布的影响规律,并讨论了熔池流动行为与合金元素分布的关系。

2 试验方法

焊接试件为11 mm厚的低碳钢板,其化学成分如表1所示。图1所示的是CO₂激光-GMA复合焊接试验示意图。焊接试验采用平板熔透焊接方式,使用20 kW CO₂激光器,聚焦透镜焦距500 mm,激光光轴垂直于试件表面,与GMA焊炬轴线呈35°。表2所示的是焊接工艺参数,激光焦点位置位于试件表面,激光保护气体为He,流量50 L/min。利用脉冲GMA焊获得一脉冲一滴的熔滴过渡方式,脉冲频率、峰值电压、基值电压、峰值电流、基值电流和脉宽分别为200 Hz、41 V、36 V、470~480 A、90~100 A和2.5 ms,电弧保护气体(体积分数)为He-38%Ar-2%O₂,流量为20 L/min。焊接试验中,激光-电弧距离为5 mm,焊接材料为低合金焊丝,化学成分如表1(Filler wire 1)所示,调节焊接速度、焊接方向、接头形式和坡口间隙等工艺参数:(1)焊接速度分别为0.7、1.0和2.0 m/min,为了实现熔透焊接,以上焊接速度对应的激光功率分别为7.5、8和12 kW;(2)在激光功率为8 kW、焊接速度为1.0 m/min的条件下,焊接方向分别为激光在前(LL)和电弧在前(LA),并采用平板堆焊(BOP)和I型坡口平板对接焊(I-butt)两种接头形式,I型坡口间隙分别为0、0.5、1.0 mm。

由于焊接熔池流动会影响焊缝合金元素的分布,因此对激光-电弧复合焊接过程中熔池流动进行了观察。利用高速摄影技术对试件表面的熔池流动进行了观察,采用Al₂O₃颗粒作为示踪粒子,Al₂O₃颗粒的移动

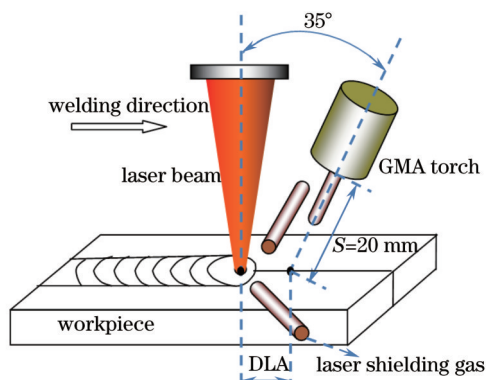


图1 CO₂激光-GMA复合焊接试验装置(焊接方向为电弧在前)

Fig.1 Experimental setup of CO₂ laser-GMA hybrid welding in leading arc

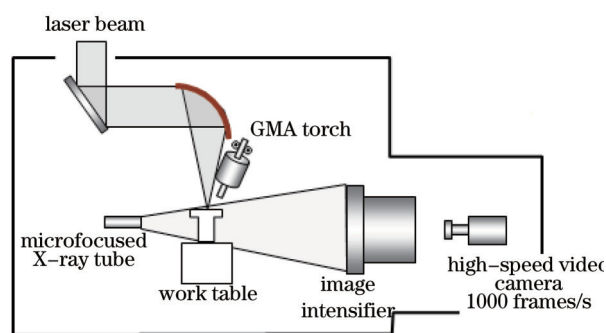


图2 X射线透射成像系统

Fig.2 Schematic illustration of micro-focused X-ray transmission imaging system

代表了熔池表面的流动行为。同时利用X射线透射成像系统观测了试件内部的熔池流动,X射线透射成像系统如图2所示。焊接过程中,在试件上表面和下表面的焊道上放置铂丝,由于铂对X射线的吸收率大于钢,液态铂的流动表示了内部熔池的流动行为。

为了评价焊缝合金元素的均匀性,采用高Ni含量的焊丝重复了上述焊接试验,高Ni焊丝成分如表1(Filler wire 2)所示。焊接后,利用电子探针微区分析(EPMA)技术分析了Ni元素在激光-电弧复合焊缝纵剖面的分布,表征焊缝合金元素的分布。

表1 母材和焊接材料的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of base metal and filler wires (mass fraction /%)

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Ti	Fe
Base metal	0.1	1.33	0.30	0.015	0.011				Balance
Filler wire 1	0.08	0.71	1.21	0.001	0.007				Balance
Filler wire 2	0.062	2.15	0.10	0.010	0.003	71.60	15.89	2.86	7.31

表2 焊接工艺参数

Table 2 Welding conditions

Laser	Power	7.5, 8, 12 kW
	Defocused distance	0 mm
	Focal length	500 mm
	Laser shielding gas	He, 50 L/min
GMA	Pulse arc frequency	200 Hz
	Peak arc voltage	41 V
	Peak arc current	470~480 A
	Base arc voltage	36 V
	Base arc current	90~100 A
	Peak time	2.5 ms
	Arc shielding gas	He~38%Ar~2%O ₂ , 20 L/min
Hybrid welding	Welding speed	0.7, 1.0, 2.0 m/min
	Welding direction	Leading laser, leading arc
	Distance between laser and arc	5 mm
	Joint type	Bead on plate (BOP)
		I-butt, gap 0, 0.5, 1.0 mm

3 试验结果与分析

3.1 焊接速度对焊缝合金元素分布的影响

图3所示的是焊接速度对焊缝Ni元素分布的影响(虚线所示为焊接试件下表面)。随着焊接速度的减小,激光-GMA复合焊缝Ni元素的分布趋向于均匀分布。当焊接速度为0.7 m/min时,复合焊缝中Ni元素的分布基本均匀;当焊接速度增加到1.0 m/min时,距焊缝底部约3 mm区域内Ni元素含量降低;当焊接速

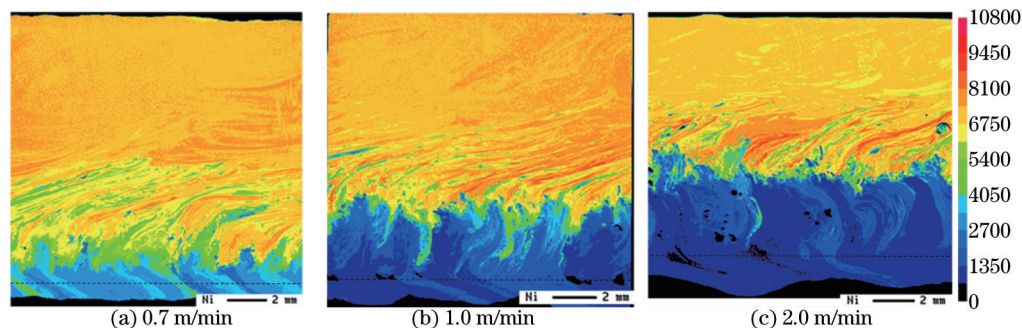


图3 不同焊接速度下复合焊缝纵剖面Ni元素分布(激光在前、平板堆焊)

Fig.3 Ni concentration profiles in longitudinal section of hybrid welds for various welding speed (leading laser, BOP)

度上升到 2.0 m/min 时, Ni 明显偏析在焊缝的中上部, 距焊缝底部约 5 mm 区域内存在贫 Ni 区。图 4 所示的是焊接速度对复合焊焊缝形状的影响。随着焊接速度的增加, 复合焊电弧焊影响区域大幅度缩小, 致使熔池体积减小, 凝固速度增加, 将不利于合金元素向熔池底部流动, 这可能导致了焊缝合金元素分布的不均匀。

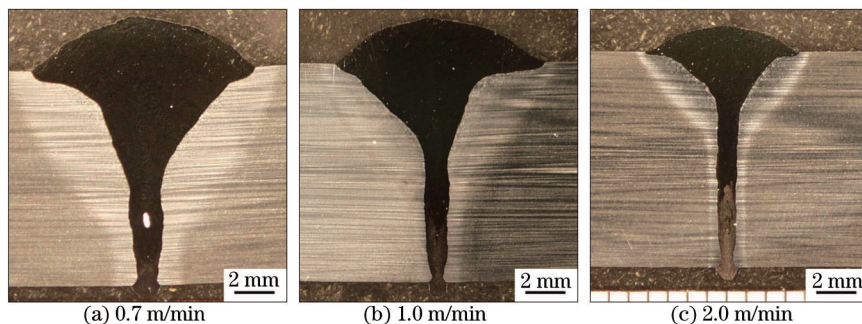


图 4 不同焊接速度下复合焊焊缝形状(激光在前、平板堆焊)

Fig.4 Weld geometry of hybrid welds for various welding speed (leading laser, BOP)

3.2 焊接方向、坡口间隙对焊缝合金元素分布的影响

图 5 所示的是焊接方向对焊缝 Ni 元素分布的影响。采用平板堆焊方式, 焊接方向为电弧在前时, Ni 元素偏聚在焊缝的中上部, 距焊缝底部 5 mm 区域内富 Ni 区和贫 Ni 区交错分布, 而焊接方向为激光在前时, Ni 元素分布略比电弧在前时均匀, 焊缝底部向上约 3 mm 区域内存在富 Ni 区和贫 Ni 区的交替。采用 I 型坡口平板对接焊方式, 焊接方向为激光在前时复合焊缝 Ni 元素分布较为均匀, 其均匀程度明显高于电弧在前时。由上可知, 焊接方向为激光在前时能够促进焊缝合金元素的均匀分布。

此外, 与平板堆焊方式相比, 采用 I 型坡口平板对接焊方式焊缝 Ni 元素分布更均匀。为了定量评价焊缝合金元素分布的均匀程度, 测量焊缝纵剖面距上表面 3 mm 区域的平均 Ni 含量 I_0 和距下表面 3 mm 区域的平均 Ni 含量 I_1 , 利用 I_0/I_1 表征焊缝合金元素分布的均匀程度, I_0/I_1 值越接近 1 表明合金元素的分布越均匀。图 6 所示的是焊接方向和接头形式对 I_0/I_1 的影响, 在平板堆焊和 I 型坡口平板对接焊两种方式下, 激光在前的 I_0/I_1 值均小于电弧在前, 这验证了激光在前的焊接方向有利于焊缝合金元素的均匀分布。而且, 当焊接方向为电弧在前时, 坡口间隙对焊缝均匀性具有明显的作用。随着坡口间隙的增大, 焊缝均匀程度越高。另一方面, 当焊接方向为激光在前时, 采用 I 型坡口平板对接焊方式均能获得较均匀的合金元素分布。

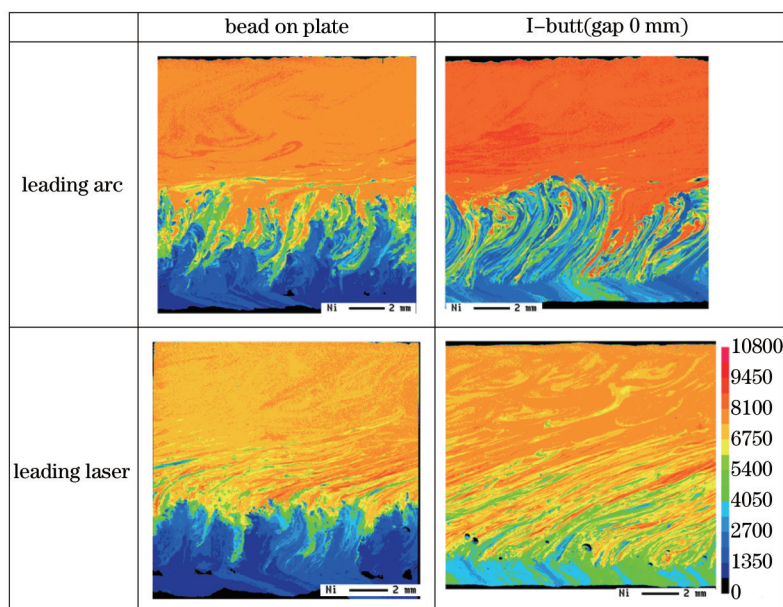


图 5 不同焊接方向条件下复合焊焊缝纵剖面 Ni 元素分布(激光功率 8 kW, 焊接速度 1.0 m/min)

Fig.5 Ni concentration profiles in longitudinal section of hybrid welds for various welding directions (laser power 8 kW, welding speed 1.0 m/min)

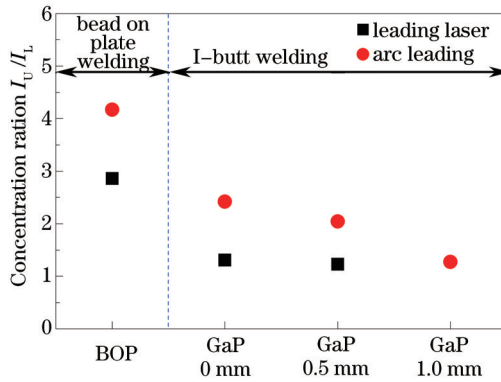


图6 焊接方向和接头形式对 I_U/I_L 的影响

Fig.6 Effect of welding direction and joint type on Ni concentration ratio of I_U/I_L

3.3 焊接方向对熔池流动行为的影响

激光-电弧复合焊焊缝合金元素的分布主要受熔池流动行为的影响,因此针对I型坡口平板对接焊(坡口间隙为0 mm)研究了焊接方向对熔池流动行为的影响。

图7所示的是不同焊接方向下 CO_2 激光-GMA 复合焊接熔池表面的熔池流动行为。当焊接方向为电弧在前时,示踪粒子 Al_2O_3 绕过激光小孔流向熔池表面的后部[如图7(a)所示],这表明熔池表面流动方向是从小孔指向熔池后部;当焊接方向为激光在前时, Al_2O_3 颗粒从熔池前沿绕过小孔,再从小孔后沿的熔池流向小孔,并停留在小孔后沿附近[如图7(b)所示],这表明熔池表面流动方向是从熔池后部指向小孔。

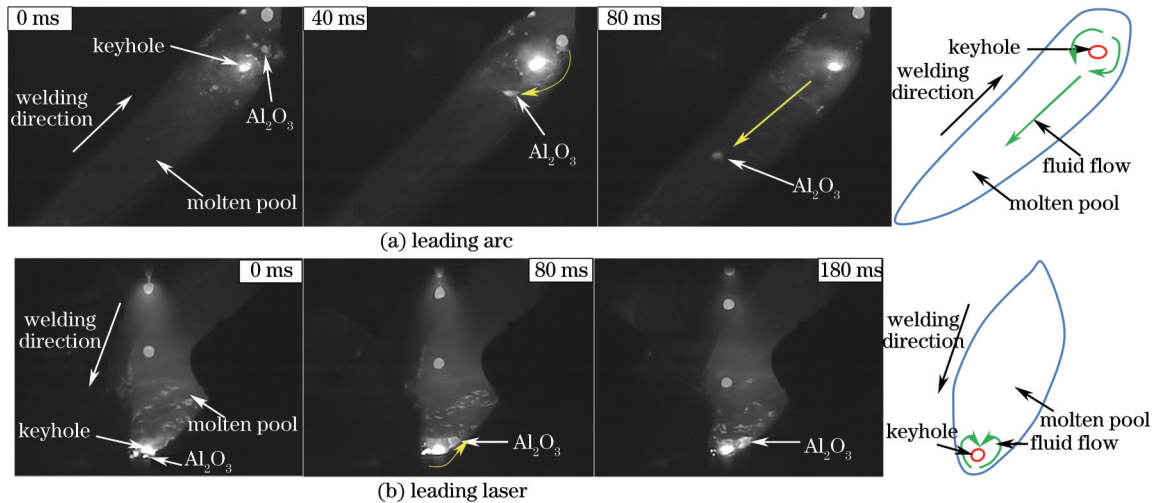


图7 不同焊接方向条件下复合焊熔池表面的熔池流动

Fig.7 Molten metal flow on pool surface for different welding directions

图8和图9所示的是X射线透射成像系统采集的 CO_2 激光-GMA 复合焊接内部熔池流动行为。在试件上表面和下表面的焊道上放置铂丝,利用液态铂流动表征熔池内部流动行为。当焊接方向为电弧在前时,液态铂沿着小孔后沿从熔池底部流向熔池上表面[如图8(a)所示],在熔池表面液态铂先流向熔池后部,然后流向熔池底部[如图9(a)所示];当焊接方向为激光在前时,在熔池下表面液态铂沿着凝固前沿向熔池后部流动[如图8(b)所示],并且液态铂沿着小孔后沿从熔池上表面流向熔池底部[如图9(b)所示]。

根据以上结果,焊接方向对熔池流动行为的影响如图10所示。焊接方向为电弧在前时,在小孔后方熔池流动从熔池底部到熔池上表面,在熔池上表面流动方向为小孔到熔池后部[如图10(a)所示],形成了“外向流动”;相反的是,焊接方向为激光在前时,在熔池表面从熔池后部向小孔流动,并且小孔后沿液体向下流动[如图10(b)所示],形成了“内向流动”。 CO_2 激光-GMA 复合焊接过程中,焊丝从熔池上方添加。当熔池流动为内向流动时,通过焊丝所添加的合金元素易达到熔池的底部,从而获得较均匀的合金元素分布。

因此,激光在前的焊接方向促进了熔池的内向流动,从而获得了较均匀的合金元素分布。

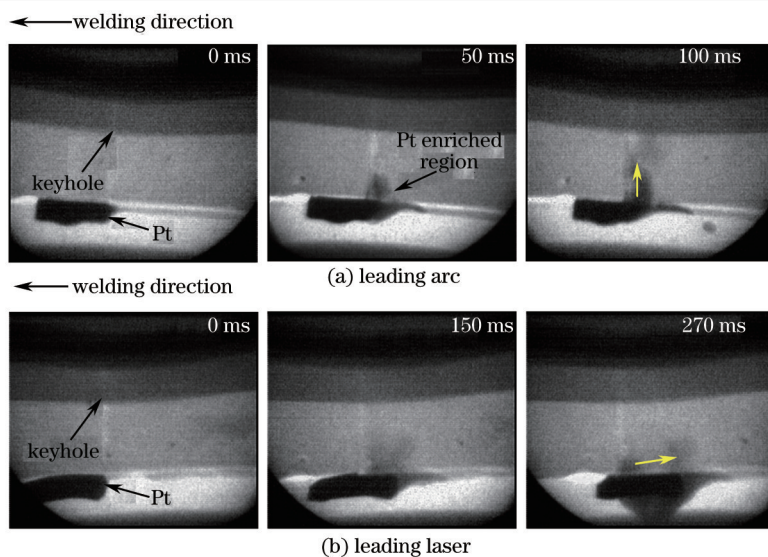


图8 不同焊接方向条件下复合焊内部熔池流动(铂丝放置试件下表面)
Fig.8 Fluid flow visualized by Pt put on bottom surface in different welding directions

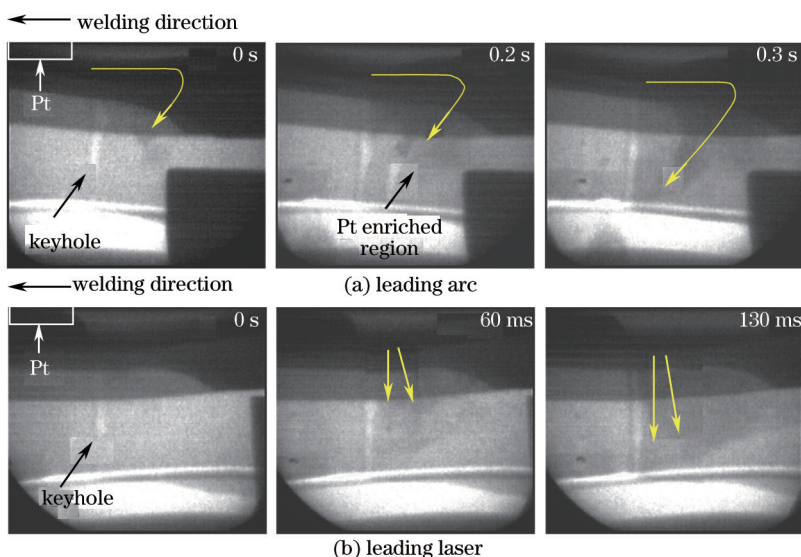


图9 不同焊接方向条件下复合焊内部熔池流动(铂丝放置试件上表面)
Fig.9 Fluid flow visualized by Pt put on top surface in different welding directions

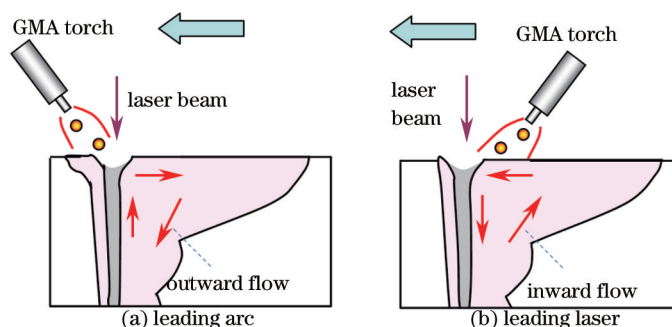


图10 不同焊接方向条件下复合焊熔池流动示意图
Fig.10 Schematic diagram of molten metal flow for different welding directions

3.4 焊接方向对熔池流动驱动力的影响

在CO₂激光-GMA复合焊接过程中,熔池流动行为主要是电弧拖拽力、熔滴对熔池的冲击力、浮力、电磁力、Marangoni对流和激光小孔蒸汽冲击力等综合影响决定的^[11-15]。浮力和激光小孔蒸汽冲击力一般促进熔

池外向流动,电磁力促进内向流动,Marangoni对流受表面张力温度系数的影响,而电弧拖拽力和熔滴对熔池的冲击力均取决于焊接方向。由本研究的结果,影响复合焊熔池流动行为变化的主要驱动力为电弧拖拽力和熔滴对熔池的冲击力。不同焊接方向下熔池驱动力情况如图 11 所示。焊接方向为电弧在前时,电弧拖拽力和熔滴对熔池的冲击力均指向熔池后部,促进了外向流动,导致了合金元素聚集在焊缝中上部(如图 5 所示),焊缝合金元素分布不均匀;而焊接方向为激光在前时,电弧拖拽力和熔滴对熔池的冲击力均指向小孔,促进了内向流动,合金元素易快速到达熔池的底部,从而获得了较均匀的合金元素分布(如图 5 所示)。

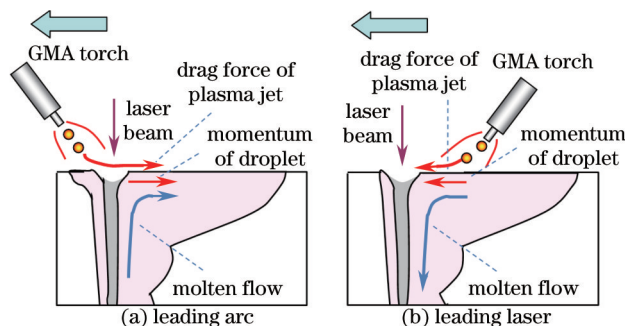


图 11 不同焊接方向条件下复合焊熔池流动驱动力

Fig.11 Driving forces of molten metal flow for various welding directions

另外,Ribic 等^[16]通过数值计算模拟了 CO₂激光-GMA 复合焊接熔池流动,研究表明焊接方向仅为激光在前时,电磁力能够促进整个熔池内向流动。焊接方向为激光在前时,电弧下方存在较大体积的熔池,电磁力能够促进这个区域内的熔池内向流动,从而带动了整个熔池的内向流动,如图 12(a)所示;而焊接方向为电弧在前时,电磁力仅能促进小孔前方较小体积的熔池流动,但无法带动整个熔池的内向流动,如图 12(b)所示。当然,电磁力对不同焊接方向下复合焊接熔池流动行为的影响需要进一步的研究。

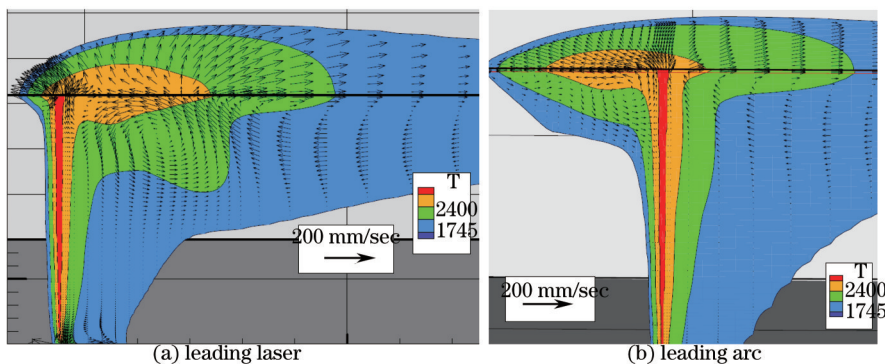


图 12 不同焊接方向条件下电磁力对熔池流动的影响^[16]

Fig.12 Influence of electro-magnetic force on molten metal flow for various welding directions^[16]

4 结 论

- 1) 随着焊接速度的减小,CO₂激光-GMA 复合焊焊缝合金元素的分布趋向于均匀分布。
- 2) 坡口间隙对复合焊焊缝均匀性具有明显的影响。随着坡口间隙的增大,焊缝合金元素均匀程度越高。
- 3) 焊接方向为激光在前时,激光-电弧复合焊接熔池流动为内向流动时(即熔池表面从熔池后部向小孔流动,并且小孔后沿液体向下流动),焊缝合金元素分布较均匀,其均匀性高于焊接方向为电弧在前时的情况。焊接方向对焊缝合金元素分布的影响规律主要取决于电弧拖拽力和熔滴对熔池冲击力的方向。当焊接方向为激光在前时,电弧拖拽力和熔滴对熔池冲击力指向小孔方向,促进了熔池内向流动。

参 考 文 献

1 Chen Wuzhu. Quality Control of Laser Welding and Cutting[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
陈武柱. 激光焊接与切割质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

- 2 C Bagger, F O Olsen. Review of laser hybrid welding[J]. *J Laser Appl*, 2005, 17(1): 2-14.
- 3 G L Qin, Z Lei, S Y Lin. Effects of Nd: YAG laser+pulsed MAG arc hybrid welding parameters on its weld shape[J]. *Sci Technol Weld Join*, 2007, 12(1): 79-86.
- 4 Cui Li, He Dingyong, Li Xiaoyan, *et al.*. Effects of welding direction on weld shape of fiber laser-MIG hybrid welded titanium alloys [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0103002.
崔 丽, 贺定勇, 李晓延, 等. 焊接方向对光纤激光-MIG复合焊接钛合金焊缝成形的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0103002.
- 5 Lei Zhenglong, Tan Caiwang, Chen Yanbin, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of X80 pipeline steel backing welded joint by fiber laser-MAG hybrid welding [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0403002.
雷正龙, 檀财旺, 陈彦宾, 等. X80管线钢光纤激光-MAG复合焊接打底层组织及性能[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0403002.
- 6 Chen Yang, Wu Shikai, Xiao Rongshi. Microstructure and performance of CO₂-MIG hybrid welding of SUS301L stainless steel[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0103004.
陈 洋, 吴世凯, 肖荣诗. SUS301L不锈钢CO₂激光-MIG复合焊接接头组织性能研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0103004.
- 7 P L Moore, D S Howse, E R Wallach. Microstructures and properties of laser/arc hybrid welds and autogenous laser welds in pipeline steels[J]. *Sci Technol Weld Join*, 2004, 9(4): 314-322.
- 8 S Fujinaga, R Ohashi, T Urakami, *et al.*. Development of all position YAG laser butt welding process with filler wire[J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2004, 22(3): 369-374.
- 9 Z J Liu, M Kutsuna, G J Xu. Microstructure and mechanical properties of CO₂ laser-MAG hybrid weld of high strength steel[J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2006, 24(4): 344-349.
- 10 M Leimser, A Russ, F Dausinger, *et al.*. Methods to influence the melt pool dynamics and the element distribution in laser welding of aluminium alloys with filler wire[C]. *Proc ICALEO*, 2004.
- 11 A Mahrle, J Schmidt. The influence of fluid flow phenomena on the laser beam welding process[J]. *Int J Heat Fluid Fl*, 2002, 23(3): 288-297.
- 12 C Limmaneevichitr, S Kou. Experiments to simulate effect of Marangoni convection on weld pool shape[J]. *Weld J*, 2000, 79(8): 231-237.
- 13 T Fuhrich, P Berger, H Hügel. Marangoni effect in laser deep penetration welding of steel[J]. *J Laser Appl*, 2001, 13(5): 178-186.
- 14 R Rai, S M. Kelly, R P Martukanitz, *et al.*. A convective heat-transfer model for partial and full penetration keyhole mode laser welding of a structural steel[J]. *Metall Mater Trans A*, 2008, 39A(1): 98-112.
- 15 W I Cho, S J Na, M H Cho, *et al.*. Numerical study of alloying element distribution in CO₂ laser-GMA hybrid welding[J]. *Comp Mater Sci*, 2010, 49(4): 792-800.
- 16 B Ribic, R Rai, T DebRoy. Heat Transfer and fluid flow in GTA/laser hybrid welding[C]. *8th International Welding Symposium*, 2007. AW2-5.

栏目编辑: 张浩佳