

激光-电弧复合焊接保护气体 O₂ 含量对焊缝均匀性和熔池流动的影响

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 研究了保护气体中 O₂ 含量对 CO₂ 激光-熔化极气体保护(GMA)复合焊缝合金元素均匀性和熔池流动行为分布的影响规律。结果表明,焊接方向为激光在前时,电弧保护气体中 O₂ 含量对复合焊缝均匀性具有明显的作用。保护气体中 O₂ 体积分数含量达到 2% 以上时,复合焊缝中合金元素的分布基本均匀。对于 He-Ar 惰性保护气体,在小孔后沿的熔池区域形成了外向流动;而当保护气体中 O₂ 含量达到 2% 以上时,熔池流动为内向流动。保护气体中 O₂ 含量对焊缝合金元素分布的影响规律主要取决于 Marangoni 对流。当电弧保护气体加入大于等于 2% O₂ 时, Marangoni 对流方向由外向流动变为内向流动,促进了整个熔池的内向流动,获得了合金元素的均匀分布。

关键词 激光技术; 激光-电弧复合焊; 保护气体; 焊缝均匀性; 合金元素; 熔池流动; 氧含量; Marangoni 对流

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0603006

Influence of Shielding Oxygen Content on Weld Homogeneity and Fluid Flow in Laser-Arc Hybrid Welding

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 The effect of shielding gas compositions containing various oxygen contents on the weld homogeneity and fluid flow is investigated during CO₂ laser and gas metal arc (GMA) hybrid welding process. The results indicate that the shielding gas compositions show significant effect on the homogeneity of weld metal in leading laser. Almost homogeneous distribution of alloying elements can be attained if the oxygen content in the arc shielding gas is more than 2%. In He-Ar shielding, the fluid flow behind keyhole is outward, whereas it is inward as the shielding gas contains greater than or equal to 2% O₂. These phenomena are mainly determined by Marangoni flow. The direction of Marangoni flow changes from outward to inward when the oxygen content in the shielding gas is over 2%. It promotes the inward flow of the entire molten pool, resulting in homogeneous distribution of alloying elements in hybrid welds.

Key words laser technique; laser-arc hybrid welding; shielding gas; weld homogeneity; alloying elements; fluid flow; oxygen content; Marangoni flow

OCIS codes 140.3390; 110.7440; 160.3900; 350.3850

1 引 言

激光-电弧复合焊接过程中,合金元素通过焊丝填充入熔池中,能够改善焊缝的性能^[1-5]。一般情况下,激光-电弧复合焊缝中合金元素的分布往往是不均匀的,虽然对于板厚较小或强度级别较低的材料并不显著影响焊缝质量,但对于高强度钢铁材料(造船、桥梁和能源装备结构)以及窄间隙深熔焊接结构等方面有明

收稿日期: 2014-12-15; 收到修改稿日期: 2015-01-20

基金项目: 国家国际科技合作专项(2015DFA50970,2015DFA51460)

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的研究。E-mail: hhnds@aliyun.com

显的影响,焊缝元素的均匀化有利于大幅提高焊缝的综合质量(强韧性、残余应力、长期工作稳定性等)和焊接结构件的使用寿命。然而,中厚板激光-电弧复合焊缝深而窄,很难获得合金元素的均匀分布^[6-8]。

前期工作中,作者研究了焊接方向对CO₂激光-熔化极气体保护(GMA)复合焊缝合金元素分布的影响规律,发现熔池流动行为对焊缝中合金元素的分布具有决定性作用^[9]。激光在前的焊接方向下,电弧拖拽力和熔滴对熔池冲击力均指向小孔,促进了熔池内向流动(即熔池表面液体由熔池后部流向小孔,并沿小孔后沿向下流动),导致了合金元素在复合焊缝中较均匀地分布。

在CO₂激光-GMA复合焊接过程中,除了电弧拖拽力、熔滴对熔池的冲击力外,浮力、电磁力、Marangoni对流和激光小孔蒸汽冲击力等也是影响熔池流动行为的主要驱动力^[10-14]。许多学者研究了Marangoni对流对激光焊接或激光-电弧复合焊接熔池流动的影响,得到了大量的研究成果^[12-16]。Mahrle和Rai等利用数值模拟的方法研究了激光焊接过程中的熔池流动,结果表明由表面张力温度系数和温度梯度引起的Marangoni对流是决定熔池流动的主要因素之一^[12-14],指出通过添加活性元素(例如氧、硫等)可使Marangoni对流的方向反转,从而导致熔池流动方向的改变。Naito等^[15]通过试验证实了这一点,发现纯Ar保护气氛下,熔池流动呈“外向流动”,在熔池表面由激光小孔处流向熔池后部,而在空气氛围下,熔池流动方向由熔池后部指向小孔,为“内向流动”。由以上内容可知,Marangoni对流对激光-电弧复合焊接熔池流动具有极大的影响,并且通过向熔池中添加氧、硫等活性元素可以改变Marangoni对流的方向,从而控制熔池的流动行为。

因此,利用在保护气体中添加少量O₂,研究了焊接保护气氛对CO₂激光-GMA复合焊缝合金元素均匀性和熔池流动行为分布的影响规律。

2 试验方法

激光-电弧复合焊试验使用20 kW CO₂激光器,试验装置如图1所示。试验过程中,采用平板对接熔透焊接方式,I型坡口间隙为0 mm。激光功率为8 kW,焦点位置位于试件表面,激光保护气体为He,流量为50 L/min。通过控制脉冲GMA焊的参数,使熔滴过渡方式为一脉冲一滴^[9]。焊接速度为1.0 m/min,焊接方向为激光在前。为了研究保护气氛的影响,在He-Ar惰性气体中分别加入含体积分数为0%、2%、10%的O₂作为电弧保护气体,流量为20 L/min。

采用11 mm厚的低碳钢板作为焊接试件,其化学成分(质量分数,下同)为:C 0.10%,Mn 1.33%,Si 0.30%,S 0.011%,P 0.015%,Fe余量;采用低合金焊丝(C 0.08%,Mn 0.71%,Si 1.21%,S 0.007%,P 0.001%)作为焊接材料。

利用示踪法,研究复合焊接熔池的流动行为。通过高速摄影技术,观察示踪粒子Al₂O₃颗粒在熔池表面的流动过程,获得熔池表面流动方向;同时,将铂丝放置于试件上表面的焊道上,利用铂对X射线的吸收率大于钢的特性,通过X射线透射成像系统观测液态铂的流动,得到试件内部的熔池流动行为。

为了评价焊缝合金元素的分布,采用高Ni含量的焊丝(Ni 71.6%,Cr 15.89%)重复上述焊接试验。焊接后,通过电子探针微区分析(EPMA)技术分析了复合焊缝纵剖面Ni元素的分布,利用Ni元素的分布来表征焊缝合金元素的分布。另一方面,为了讨论熔池氧含量对Marangoni对流的影响,对焊缝近表面区域的氧含量进行了分析,氧含量分析取样位置如图2所示。

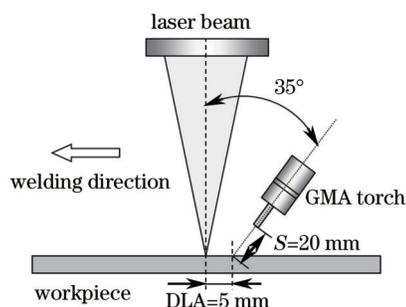


图1 CO₂激光-GMA复合焊接装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of CO₂ laser-GMA hybrid welding system in leading laser

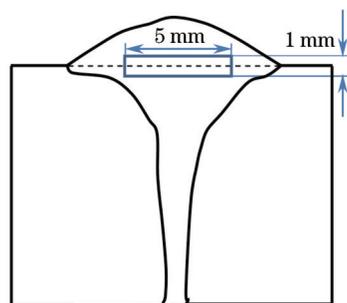


图2 氧含量分析取样位置

Fig.2 Location of sample used for oxygen analysis

3 试验结果与分析

3.1 焊缝合金元素分布

图3所示的是激光-电弧复合焊缝纵剖面Ni元素分布情况。电弧保护气体为He-Ar惰性气体时,焊缝中Ni元素分布不均匀,焊缝中上部Ni元素明显偏析,距焊缝底部约7 mm区域内贫Ni区和富Ni区交替分布。然而,当保护气体中O₂含量达到2%以上时,复合焊缝中Ni元素的分布基本均匀。这表明保护气氛对激光-电弧复合焊缝合金元素分布具有很大的影响。

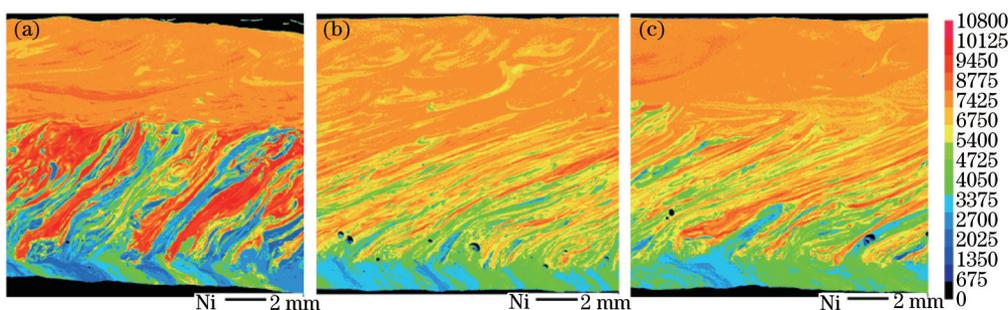


图3 保护气氛对复合焊缝纵剖面Ni元素分布的影响(激光在前)。(a) 0% O₂; (b) 2% O₂; (c) 10% O₂

Fig.3 Effect of shielding gas compositions on Ni concentration in longitudinal section of hybrid welds (leading laser).

(a) 0% O₂; (b) 2% O₂; (c) 10% O₂

3.2 熔池流动行为

图4所示的是保护气体O₂含量对CO₂激光-GMA复合焊接表面熔池流动行为的影响。电弧保护气体为He-Ar惰性气体时,绕过激光小孔后Al₂O₃颗粒流向熔池表面中部氧化物聚集的区域[如图4(a)所示],这表明激光小孔至熔池表面中部的区域内熔池流动方向是外向流动(即从小孔指向熔池后部);在电弧保护气体加入2% O₂时,Al₂O₃颗粒先从小孔后方绕过小孔,没有流向熔池后部,而是从小孔后方的熔池流向小孔,停留在小孔后沿附近[如图4(b)所示],这表明熔池表面流动方向是内向流动(即从熔池后部指向小孔);在电弧保护气体加入10% O₂时,熔池表面流动行为与电弧保护气体加入2% O₂时同样,流动方向为内向流动。由以上内容可知,随着保护气体中O₂含量增大,复合焊接熔池表面流动方向从外向流动反转为内向流动。

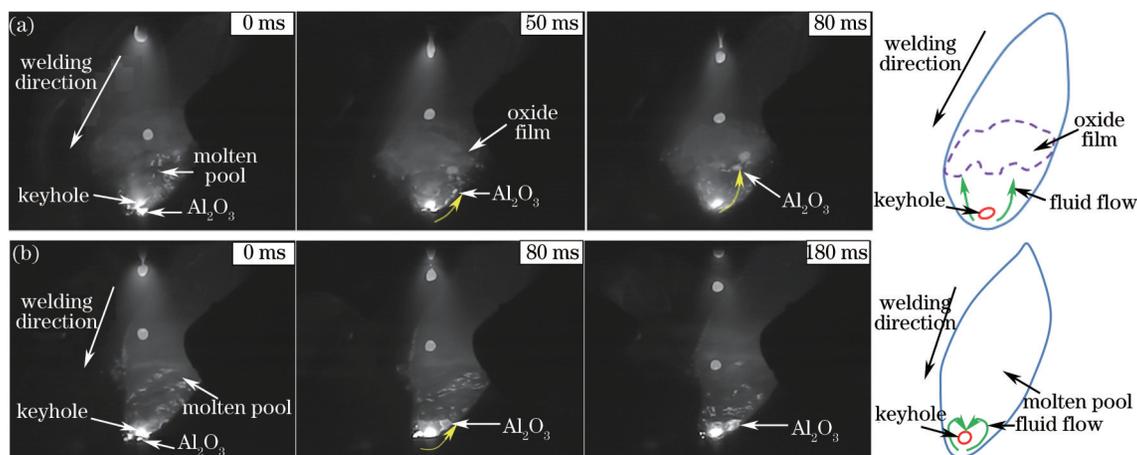


图4 保护气氛对激光-电弧复合焊接表面熔池流动行为的影响。(a) 0% O₂; (b) 2% O₂

Fig.4 Effect of shielding gas compositions on molten metal flow of pool surface in laser-arc hybrid welding. (a) 0% O₂; (b) 2% O₂

激光-电弧复合焊接过程中,由于电弧的存在,电弧拖拽力、熔滴冲击力、电磁力等驱动力将会对熔池流动产生较大的影响^[9]。为了进一步揭示保护气体中O₂含量对熔池流动的作用,研究了不同O₂含量保护气氛下激光焊接的熔池流动行为,这样能够排除电弧对熔池的影响。

图5所示的是不同O₂含量保护气氛下激光焊接表面熔池流动行为。保护气体为纯He时,熔池表面中部形成氧化物聚集的区域,激光小孔至熔池表面中部的区域内熔池流动方向是外向流动[如图5(a)所示];当保护气体加入10% O₂时,熔池表面流动方向是内向流动[如图5(b)所示]。由此可知,不同O₂含量保护气氛下激

光焊接的熔池流动行为与上述的复合焊接熔池行为相似。另外, Naito 等^[15]在 Nd:YAG 激光焊接中采用纯 Ar 和空气作为保护气体, 也发现类似的熔池流动行为。

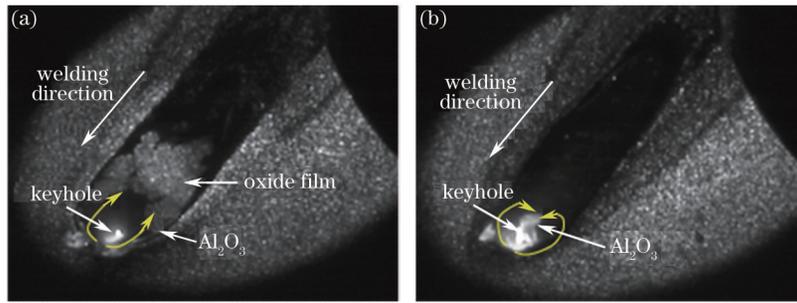


图5 不同 O₂ 含量保护气氛下激光焊接表面熔池流动行为。(a) 0% O₂; (b) 10% O₂

Fig.5 Fluid flow behaviour on pool surface in single laser welding for different oxygen contents of shielding gas. (a) 0% O₂; (b) 10% O₂

图 6 所示的是 CO₂ 激光焊接内部熔池流动行为(X 射线透射成像系统采集的图像)。铂丝放置于试件上表面的焊道上, 液态铂流动表征了熔池内部流动行为。保护气体为纯 He 时, 液态铂在熔池表面先流向熔池后部, 然后逐渐地向熔池底部流动, 液态铂主要聚集于熔池中上部[如图 6(a)所示]; 保护气体加入 10% O₂ 时, 沿着小孔后沿液态铂从熔池上表面迅速流向熔池底部[如图 6(b)所示]。

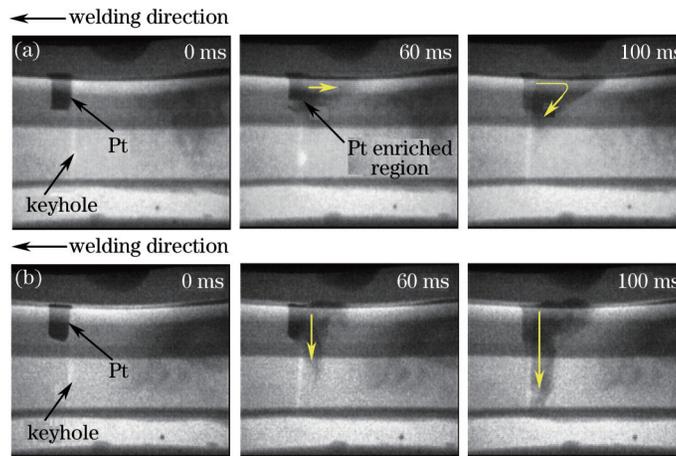


图6 不同 O₂ 含量保护气氛下激光焊接熔池内部熔池流动(铂丝位于试件上表面)。(a) 0% O₂; (b) 10% O₂

Fig.6 Fluid flow in laser welding for different oxygen contents of shielding gas visualized (Pt put on top surface). (a) 0% O₂; (b) 10% O₂

由以上结果可知, 不同 O₂ 含量保护气氛下复合焊接熔池流动行为如图 7 所示。对于 He-Ar 惰性保护气体, 在小孔后沿的熔池区域为外向流动, 熔池表面液体从小孔流向熔池中部, 然后逐步地流向熔池底部, 如图 7(a)所示; 而保护气体中加入大于等于 2% O₂ 时, 熔池流动为内向流动, 在熔池表面流动方向从熔池后部指向小孔, 并沿着小孔后沿快速向下流动, 如图 7(b)所示。因此, 保护气体 O₂ 含量大于 2% 时, 熔池流动为内向流动, 获得了合金元素的均匀分布。

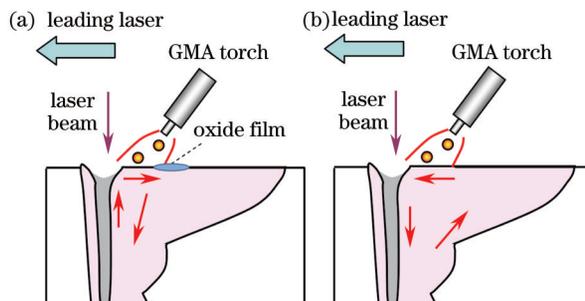


图7 不同 O₂ 含量保护气氛下复合焊接熔池流动行为。(a) 0% O₂; (b) ≥2% O₂

Fig.7 Fluid flow in hybrid welding for various oxygen contents in shielding gas. (a) 0% O₂; (b) ≥2% O₂

3.3 保护气体氧含量对熔池流动驱动力的影响

在 CO₂激光-GMA 复合焊接过程中,调节电弧保护气体中的 O₂ 含量主要改变了 Marangoni 对流的影响^[10-16]。Marangoni 对流主要取决于表面张力温度系数 $d\gamma/dT$ 和温度梯度。一般情况下,对于纯金属和许多合金,表面张力温度系数 $d\gamma/dT$ 是负数,导致了在这些材料激光-电弧复合焊接熔池表面液体从小孔处的高温区域流向熔池后部的低温区域,即外向流动。如果在熔池添加 O、S 等活性元素, $d\gamma/dT$ 将由负数变为正数,熔池流动方向反转为内向流动。

对于 Fe-O 系焊接熔池,表面张力 γ 计算公式为^[17]

$$\gamma = \gamma_m^0 - A(T - T_m) - RT\Gamma_s \ln\left\{1 + k_1 \alpha_i \exp\left[-(\Delta H^0/RT)\right]\right\}, \quad (1)$$

式中 A 为常数 $4.3 \times 10^{-4} \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{K})$, R 为气体常数 $8.3143 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{K})$, Γ_s 为饱和表面过剩 $2.03 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{mol}/\text{m}^2$, k_1 为与偏聚熵有关的常数 1.38×10^{-2} , ΔH^0 为标准吸热 $1.463 \times 10^5 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{mol})$, α_i 为氧元素含量。

由(1)式可知,表面张力温度系数 $d\gamma/dT$ 计算公式为^[18]

$$\frac{d\gamma}{dT} = -A - R\Gamma_s \ln(1 + \alpha_i K_{\text{seg}}) - \frac{\alpha_i K_{\text{seg}}}{(1 + \alpha_i K_{\text{seg}})} \frac{\Gamma_s (\Delta H^0)}{T}, \quad (2)$$

式中,

$$K_{\text{seg}} = k_1 \exp(-\Delta H^0/RT), \quad (3)$$

根据(2)式,计算不同氧含量和温度条件下表面张力系数,如图 8 所示。对于纯铁或较低的氧含量,表面张力温度系数 $d\gamma/dT$ 是负数。多数情况下,随着温度的上升, $d\gamma/dT$ 将由正数变为负数,这表明 Marangoni 对流由内向流动反转为外向流动。另外,随着氧含量的增加, $d\gamma/dT$ 由正变负的临界温度升高。

上一节的研究结果表明,焊接方向为激光在前时,随着电弧保护气体中 O₂ 含量的增大,熔池流动由外向流动反转为内向流动。在激光焊接过程中,也发现了相同的现象。这说明随着 O₂ 含量的增大,Marangoni 对流促进了熔池流动方向的改变。为了评估 Marangoni 对流的影响,分析了复合焊缝近表面金属的氧含量,结果如图 9 所示。当电弧保护气体为 He-Ar 惰性气体时,焊缝氧体积分数含量仅为 0.0025%。由图 9 可知,氧含量 0.0025% 对应的 $d\gamma/dT$ 由正变负的临界温度约为 1600 °C,远低于小孔周围的熔池温度,所以小孔附近的 Marangoni 对流方向为外向流动,导致了小孔后方区域内的熔池流动为外向流动。1600 °C 区域约在复合焊接熔池的中部^[16,18],意味着在熔池中部至熔池后部的区域内 $d\gamma/dT$ 为正,此处 Marangoni 对流为内向流动,这可能导致了氧化物聚集在熔池中部[如图 4(a)所示]。氧化物来源可能有两种情况:示踪粒子 Al₂O₃ 和在熔池后部因保护不好而产生的氧化物,随着熔池流动聚集在熔池中部区域,由于该区域温度不高,Al₂O₃ 等氧化物未能完全熔化而形成了局部的氧化膜。当电弧保护气体加入大于等于 2% O₂ 时,焊缝氧含量增加, $d\gamma/dT$ 由正变负的临界温度上升,熔池高温区域的 Marangoni 对流方向由外向流动变为内向流动,从而促进了整个熔池的内向流动,获得了合金元素的均匀分布。

另外,本研究条件下 CO₂激光-GMA 复合焊焊缝氧含量为 0.0025~0.02%。考虑氧含量对焊缝性能的影响

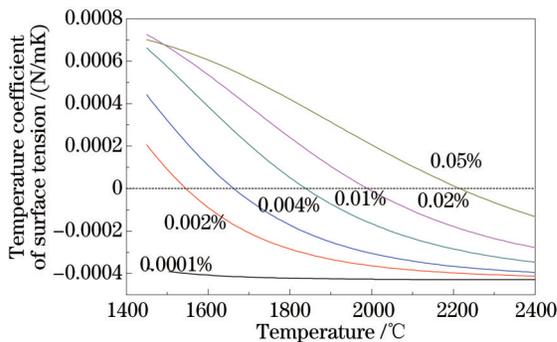


图 8 不同氧含量下 Fe-O 系熔池表面张力温度系数

Fig.8 Surface tension temperature coefficient of Fe-O system for different oxygen contents

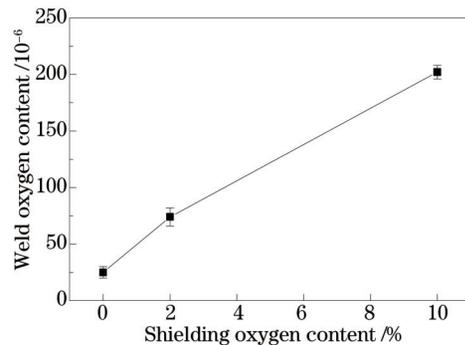


图 9 不同保护气氛下焊缝氧含量

Fig.9 Weld oxygen content for different shielding gas compositions

响,对于不同强度级别的钢铁材料,需要选择 O_2 含量合适的保护气体。对于500~800 MPa级低合金高强钢,采用10% O_2 含量的电弧保护气体,焊缝氧含量约为0.02%,有利于促进针状铁素体的形成,提高焊缝的韧性;而对于800 MPa级以上的低合金高强钢,由于焊缝组织主要由板条贝氏体和低碳马氏体组成,采用约2% O_2 含量的电弧保护气体,焊缝氧含量约为0.007%,将有利于焊缝韧性的改善。

前期工作中,研究表明焊接方向对焊缝合金元素的分布同样具有很大的作用。为了分析焊接方向和保护气氛对焊缝合金元素分布影响的大小,在焊接方向为电弧在前的条件下,研究了保护气体中 O_2 含量对焊缝合金元素分布的影响。图10所示的是电弧在前焊接方向、不同保护气氛下焊缝Ni元素的分布。尽管随着 O_2 含量增大,合金元素分布均匀性略有改善,但焊缝合金元素的分布明显不均匀。换言之,采用电弧在前的焊接方向,保护气体中 O_2 含量在0~10%范围内时,均无法获得合金元素的均匀分布。因此,在本研究条件下,焊接方向(即电弧拖拽力和熔滴对熔池冲击力)对焊缝合金元素分布的影响力大于保护气氛 O_2 含量(即Marangoni对流)的作用。

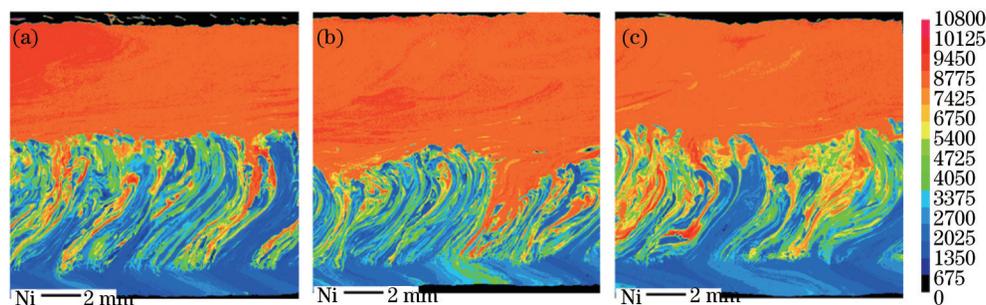


图10 保护气体气氛对复合焊缝纵剖面Ni元素分布的影响(电弧在前)。(a) 0% O_2 ; (b) 2% O_2 ; (c) 10% O_2

Fig.10 Effect of shielding gas compositions on Ni concentration in longitudinal section of hybrid welds (leading arc).

(a) 0% O_2 ; (b) 2% O_2 ; (c) 10% O_2

4 结 论

1) 焊接方向为激光在前时,电弧保护气体中 O_2 含量对复合焊缝均匀性具有明显的作用。当保护气体中 O_2 含量达到2%以上时,复合焊缝中合金元素的分布基本均匀。

2) 激光在前焊接方向下,对于He-Ar惰性保护气体,在小孔后沿的熔池区域形成了外向流动;而当保护气体中 O_2 含量达到2%以上时,熔池流动为内向流动。

3) 保护气体中 O_2 含量对焊缝合金元素分布的影响规律主要取决于Marangoni对流。当电弧保护气体为He-Ar惰性气体时,小孔附近的Marangoni对流方向为外向流动,导致了小孔后方区域内的熔池流动为外向流动;当电弧保护气体加入大于等于2% O_2 时,Marangoni对流方向由外向流动变为内向流动,从而促进了整个熔池的内向流动,获得了合金元素的均匀分布。

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 Bagger C, Olsen F O. Review of laser hybrid welding[J]. J Laser Appl, 2005, 17(1): 2-14.
- 3 Cai Xiaoyu, Li Huan, Yang Lijun, *et al.*. Improvement of weld appearance of laser-short circuiting transfer metal-inert gas (MIG) hybrid welded aluminum alloys[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0503001.
蔡笑宇, 李 桓, 杨立军, 等. 铝合金激光短路过渡熔化极惰性气体保护复合焊缝成形改善[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0503001.
- 4 Chen Yang, Wu Shikai, Xiao Rongshi. Microstructure and performance of CO_2 -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 CO_2 激光-MIG复合焊接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103004.
- 5 Moore P L, Howse D S, Wallach E R. 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.

- 6 Fujinaga S, Ohashi R, Urakami T, *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.
- 7 Liu Z J, Kutsuna M, Xu G J. 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.
- 8 Leimser M, Russ A, Dausinger F, *et al.*. Methods to Influence the Melt Pool Dynamics and the Element Distribution in Laser Welding of Aluminium Alloys with Filler Wire[A]. ICALEO, 2004, 531.
- 9 Zhao Lin, Tsukamoto Susumu, Arakane Goro, *et al.*. Distribution of wire feeding elements in laser-arc hybrid welds[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0406006.
赵琳, 塚本进, 荒金吾郎, 等. 激光-电弧复合焊焊缝合金元素分布的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0406006.
- 10 Limmaneevichitr C, Kou S. Experiments to simulate effect of Marangoni convection on weld pool shape[J]. Weld J, 2000, 79(8): 231s-237s.
- 11 Fuhrich T, Berger P, Hügel H. Marangoni effect in laser deep penetration welding of steel[J]. J Laser Appl, 2001, 13(5): 178-186.
- 12 Mahrle A, Schmidt J. The influence of fluid flow phenomena on the laser beam welding process[J]. Int J Heat Fluid Fl, 2002, 23(3): 288-297.
- 13 Rai R, Roy G G, DebRoy T. A computationally efficient model of convective heat transfer and solidification characteristics during keyhole mode laser welding[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(5): 054909.
- 14 Rai R, Kelly S M, Martukanitz R P, *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, 39(1): 98-112.
- 15 Naito Y, Mizutani M, Katayama S. Effect of oxygen in ambient atmosphere on penetration characteristics in single yttrium-aluminum-garnet laser and hybrid welding[J]. J Laser Appl, 2006, 18(1): 21-27.
- 16 Cho W I, Na S J, Cho M H, *et al.*. Numerical study of alloying element distribution in CO₂ laser-GMA hybrid welding[J]. Comp Mater Sci, 2010, 49(4): 792-800.
- 17 Sahoo P, Debroy T, Mcnallan M J. Surface tension of binary metal-surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy[J]. Metall Trans B, 1988, 19(3): 483-491.
- 18 Zhao Y Z, Zhao H Y, Lei Y P, *et al.*. Theoretical study of Marangoni convection and weld penetration under influence of high oxygen content in base metal[J]. Sci Technol Weld Join, 2007, 12(5): 410-417.

栏目编辑: 张浩佳