

不锈钢激光-电弧双面焊接头熔化特征分析

赵耀邦 雷正龙* 陈彦宾

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 在 4 mm 厚不锈钢激光-电弧双面焊接试验的基础上,研究了激光功率、电弧电流对接头形貌特征和接头特征量的影响规律,并对熔化效率进行了分析。结果表明,在较小的能量匹配下,双面焊接头呈现出激光焊与电弧焊的混合特征,随着热输入的增大,混合特征消失;增大激光功率,可使激光侧焊缝熔宽增加,而电弧侧焊缝熔宽减小,增加电弧电流,可使电弧侧焊缝熔宽增加,而对激光侧焊缝影响很小;激光功率和电弧电流增加都对焊缝中部最小熔宽有明显的增加;中部最小熔宽的深度随激光功率增加而增加,而电弧电流则起到相反的作用。在非熔透条件下,激光对电弧焊的熔化效率影响很明显,而电弧对激光焊的影响很小;在熔透条件下,增加激光功率、电弧电流对激光-电弧双面焊的熔化效率都有显著的提高。

关键词 激光技术;熔化特征;激光-电弧双面焊;接头特征;熔化效率

中图分类号 TG456.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0203001

Analysis of Melting Characteristics of Laser-Arc Double-Sided Welding for Stainless Steel

Zhao Yaobang Lei Zhenglong Chen Yanbin

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Based on the experiments of laser-arc double-sided welding (LADSW) for a 4-mm thick stainless steel, the effects of laser power and arc current on weld cross-section, joint parameters and melting efficiency are mainly discussed. The results show that the weld cross-section of LADSW takes on the combination of typical weld profiles of laser welding and arc welding at lower heat input, while the combination characteristics doesn't exist at higher heat input. The weld width at laser side increases with the increasing of laser power, whereas the weld width at arc side decreases at some extent. The increase of arc current can contribute to the increase of weld width at the arc side, but it doesn't have much effect on the weld width at the laser side. The minimal weld width increases with the increase of both the laser power and arc current. The weld depth from minimal weld width to the laser side increases with the increase of the laser power, while decreases with the increase of the arc current. In the lack of penetration joint, the effect of the laser power on melting efficiency of arc welding is evident, while the effect of arc current on melting efficiency of the laser welding is little. In the full penetration joint, the melting efficiency of LADSW increases with the increase of both the laser power and arc current.

Key words laser technique; melting characteristics; laser-arc double-sided welding; joint characteristics; melting efficiency

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

为了解决激光焊成本高、间隙适应性差的问题,

Stein^[1]提出了激光-电弧复合焊的思想。激光-电弧协同作用能够充分发挥激光焊与电弧焊各自的优

收稿日期: 2010-08-13; 收到修改稿日期: 2010-09-13

基金项目: 哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划(HITQJNS. 2008. 020)和现代焊接生产技术国家重点实验室自主探索项目资助课题。

作者简介: 赵耀邦(1982—),男,博士研究生,主要从事激光-电弧双面焊方面的研究。E-mail: zhaoyaobang@gmail.com

导师简介: 陈彦宾(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光加工基础及应用等方面的研究。

E-mail: chenyb@hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: leizhenglong@hit.edu.cn

势,又弥补了各自的不足,因此吸引了各国学者的深入研究^[2~5]。激光-电弧复合焊一个重要的物理现象就是激光匙孔对电弧的压缩与吸引作用,导致电弧能量密度增加,从而提高焊接熔化效率^[1~3,6]。在复合焊接过程中,激光束需穿过电弧等离子体后才到达工件,电弧等离子体通过逆韧致辐射机制吸收激光的能量^[6],尤其是对于 CO₂ 激光,吸收率高达 40%^[7]。电弧对激光能量的吸收甚至会导致复合焊的熔深小于单激光焊^[8]。研究者还发现,在激光-电弧复合焊接中,只有在电弧电流较小的时候,激光对电弧具有压缩、吸引作用,电弧能量密度增加;电流较大时,电弧对激光能量吸收加剧,电弧反而膨胀,激光焊从匙孔焊转向热导焊,复合增强效应不复存在^[9]。

针对激光-电弧复合焊接的局限性,避免电弧对激光的直接作用,哈尔滨工业大学开展了铝合金激光-电弧双面焊的研究工作^[10~12]。对 4 mm 厚 5A06 铝合金激光-电弧双面焊的焊接特性、电弧特征、熔化效率展开了初步的研究,表明了该方法的优质、高效性。

为了调节激光-电弧双面焊激光与电弧的能量匹配条件、控制接头形状和优化焊接质量,本文在 4 mm 厚 304 不锈钢焊接工艺试验的基础上进一步分析激光-电弧双面焊接头的熔化特征。通过工艺试验获得了激光功率、电流强度这两个重要参数下的典型接头形貌,在此基础上定义了接头特征量,探讨了激光与电弧能量对接头特征量的影响规律,分析了双面焊熔透与非熔透下熔化效率的变化。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验材料为 4 mm 厚 304 不锈钢,其化学成分如表 1 所示。

表 1 304 不锈钢化学成分(质量分数,%)

Table1 Chemical composition of 304 stainless steel (mass fraction,%)

| Element | Content |
|---------|----------|
| Cr | 18~20 |
| Ni | 8.0~10.5 |
| C | ≤0.08 |
| Si | ≤1.00 |
| Mn | ≤2.00 |
| P | ≤0.05 |
| S | ≤0.03 |
| Fe | balance |

2.2 试验方法

ROFIN-SINAR 公司生产的 SLAB DC-030 型 CO₂ 激光器和松下 WX-300 逆变 TIG 电弧焊机一起构成激光-电弧双面焊的热源。在焊接过程中,激光束与电弧从工件两侧同时对称加热,保持激光束和电弧焊枪的轴线与工件垂直并固定,由立焊行走机构带动工件垂直运动,如图 1 所示。

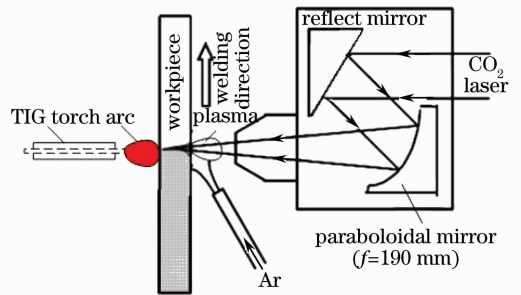


图 1 激光-电弧双面焊示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser-arc double-sided welding

氩弧焊(TIG)电弧采用直流正接,氩保护气流量为 13 L/min,激光焦距 190 mm,光斑直径 0.1 mm,离焦距 0,焊接方向为立向上焊。

3 结果和讨论

3.1 典型参数下的接头形貌特征

图2为电弧电流不变,不同激光功率下典型的

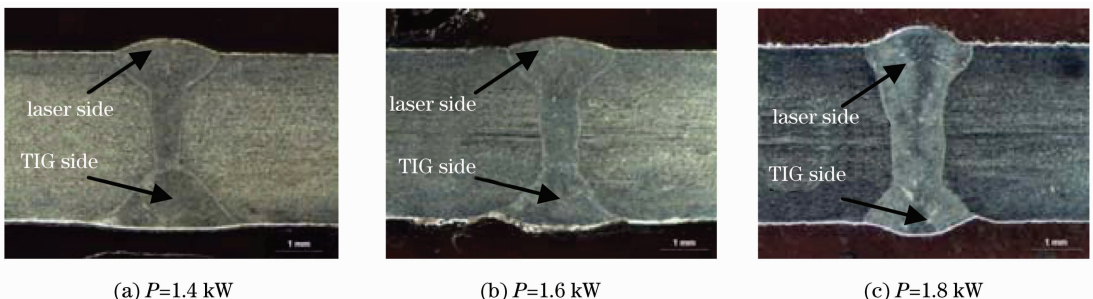


图 2 不同激光功率下的接头形貌 ($I=150\text{ A}$, $v=1.0\text{ m/min}$)

Fig. 2 Typical weld cross-section at different laser powers ($I=150\text{ A}$, $v=1.0\text{ m/min}$)

双面焊接头形貌(上部为激光焊缝,下部为电弧焊缝,文中其他双面焊接头形貌也如此)。

可以看出,当激光功率增加时,焊缝中部熔宽有所增加。而电弧侧熔宽却有所减小,这可能是激光-电弧双面焊中电弧在激光作用下发生了收缩,并且随着激光功率的增加收缩程度加剧,使得电弧的加热区域更为集中^[10]。

图 3,4 分别为激光功率为 1.4 kW 和 1.6 kW,电弧电流变化时典型的双面焊接头形貌。可以看到电弧电流对电弧一侧熔宽增加非常显著,而对焊缝中部和激光侧的熔宽增加相对要弱。同时,当热输

入较小时,焊缝两侧呈现出激光与电弧各自的形貌特征,如图 3(a),(b)和图 4(a),(b)所示。而当热输入超过某一临界范围后,焊缝两侧各自的形貌特征消失,呈现出一种均匀过渡的接头形貌,如图 3(c),图 4(c)所示。激光功率增加,双面焊熔透所需的临界电流变小,激光功率为 1.4 kW 时,熔透所需最小电流为 150 A,如图 3(a)所示,而当激光功率增加到 1.6 kW 时,熔透所需最小电流下降到 100 A,如图 4(a)所示;同时两侧呈现出的激光与电弧各自形貌特征消失的临界电流也随之减小,如图 3(c)和图 4(c)所示。

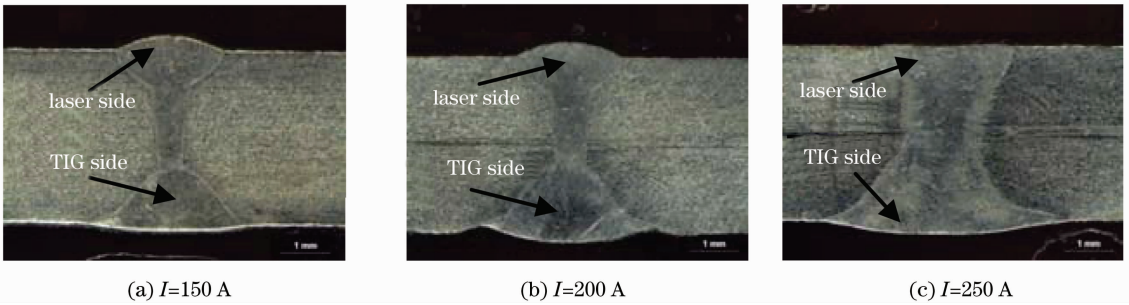


图 3 $P=1.4\text{ kW}, v=1.0\text{ m/min}$ 时不同电弧电流的接头形貌

Fig. 3 Typical weld cross-section at different arc currents when $P=1.4\text{ kW}, v=1.0\text{ m/min}$

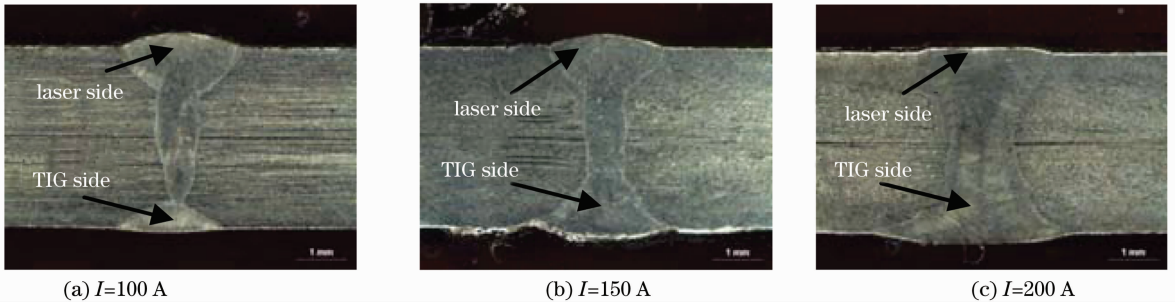


图 4 $P=1.6\text{ kW}, v=1.0\text{ m/min}$ 时不同电弧电流的接头形貌

Fig. 4 Typical weld cross-section at different arc currents when $P=1.6\text{ kW}, v=1.0\text{ m/min}$

3.2 激光与电弧能量对接头特征量的影响

为了表征激光-电弧双面焊独特的接头形式,对接头特征量进行定义,如图 5 所示。其中 W_1, W_a 分别为激光和电弧侧的焊缝熔宽, W_m 为焊缝中部的最小熔宽, h 为激光侧到最小熔宽的深度。

图 6 为激光功率对电弧与激光侧焊缝熔宽的影响。在电流为 150 A 时,激光对激光侧的熔宽影响较小,而当电弧电流增大到 200 A 时,随着激光功率的增加,激光侧熔宽的上升趋势明显增加。然而激光功率增加时,电弧侧的熔宽不但没有增加,反而在功率较大时略有下降,分析认为是激光功率的增大使电弧产生了收缩,加热区域更窄所致。图 7 为电弧电流对电弧与激光侧焊缝熔宽的影响。随着电弧

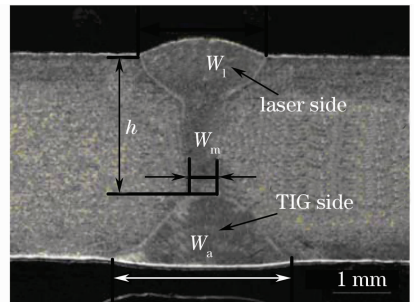


图 5 接头特征量定义

Fig. 5 Definition of joint parameters of laser-arc double-sided welding

电流的增加,电弧侧熔宽的增加明显,而激光侧熔宽则变化较小,在电流较小时有略微下降的趋势,继续增大电流时熔宽才略有增加。这说明,无论是激光

还是电弧,仅对自身熔宽影响较大,激光功率对电弧侧熔宽以及电弧电流对激光侧熔宽的影响均较小,甚至随着能量的增加都有不同程度的下降趋势。因此想要控制双面焊接头激光和电弧侧的熔宽只能通过改变自身能量来调节。

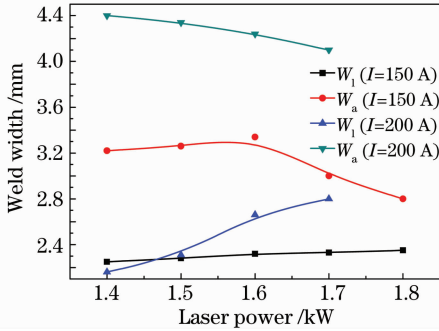


图 6 激光功率对激光与电弧侧熔宽的影响

Fig. 6 Effects of laser power on weld width at laser side and arc side

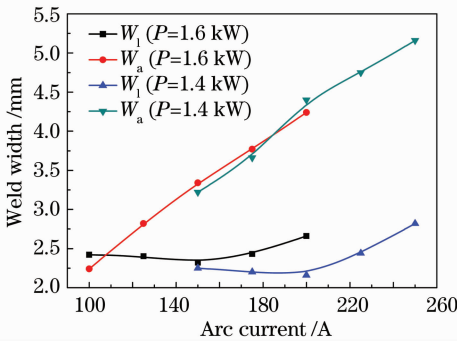


图 7 电弧电流对激光与电弧侧熔宽的影响

Fig. 7 Effects of arc current on weld width at laser side and arc side

图 8,9 分别为激光功率、电弧电流对中部最小熔宽的影响。可以看出,无论是增加激光功率,还是提高电弧电流,焊缝中部的最小熔宽都增加,且增加的趋势基本相同,焊缝的熔透程度增大。中部最小

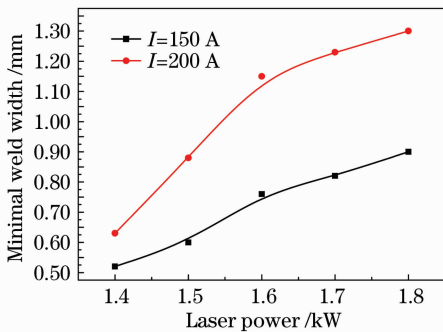


图 8 激光功率对中部最小熔宽的影响

Fig. 8 Effects of laser power on minimal weld width at the middle of joint

熔宽反映了激光-电弧双面焊的熔透程度,这表明无论是增加激光功率还是改变电弧电流都有助于双面焊接头的熔透。

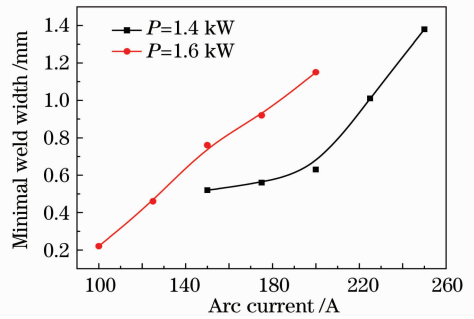


图 9 电弧电流对中部最小熔宽的影响

Fig. 9 Effects of arc current on minimal weld width at the middle of joint

最小熔宽的深度(h)反映了两热源能量的相互作用效果,改变激光与电弧的能量匹配条件,可实现焊缝中激光侧到最小熔宽深度的控制。随着激光功率的增加,双面焊最小熔宽的深度增加,如图 10 所示。随着电弧电流的增大,最小熔宽深度减小,最小熔宽的位置由靠近电弧侧迅速转移到激光侧,如图 11 所示。同时还发现,当焊接热输入达到一定程

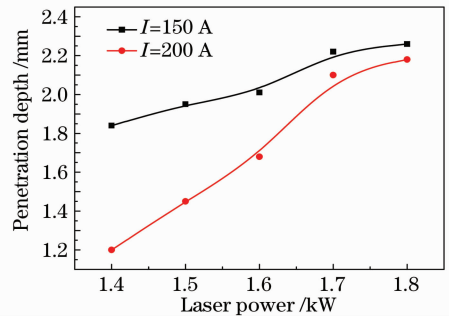


图 10 激光功率对最小熔宽深度的影响

Fig. 10 Effects of laser power on penetration depth of minimal weld width

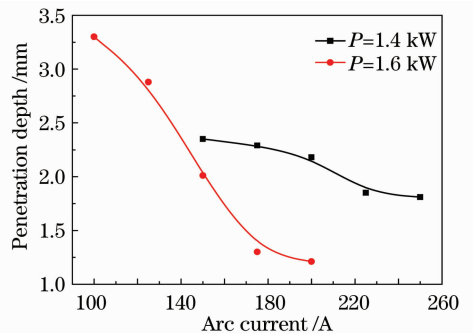


图 11 电弧电流对最小熔宽深度的影响

Fig. 11 Effects of arc current on penetration depth of minimal weld width

度后,最小熔宽的深度变化趋势不再明显,这表明热输入较大时,两热源形成稳定的同一熔池,如图 3(c)和图 4(c)所示,改变能量对比对焊缝最小熔宽深度的影响不大。

3.3 熔化效率分析

为了定量评估激光-电弧双面焊热源的相互作用程度,引入热源熔化效率的概念。熔化效率 η_m 指的是用于熔化焊接金属消耗的热功率与焊接总功率的比值,其计算公式为

$$\eta_m = \frac{Av\rho \left(\int_{T_0}^{T_m} C_p dT + \Delta H_m \right)}{P}$$

式中 v 为焊接速度, A 为熔化面积, ρ 为金属或合金密度, C_p 为比热容, T_m 为金属或合金熔点, T_0 为室温, ΔH_m 为金属或合金的熔化潜热, P 为热源功率。焊缝横截面积通过图像处理获取,试验中计算所需其他参数如表 2 所示。

表 2 焊接熔化效率相关参数

Table 2 Parameter value about energy efficiency

| $v / (\text{m/s})$ | $\rho / (\text{g/mm}^3)$ | $C_p / [\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})]$ | T_m / C | T_0 / C | $\Delta H_m / (\text{J/g})$ |
|--------------------|--------------------------|--|------------------|------------------|-----------------------------|
| 1000 | 7.85×10^{-3} | 0.51 | 1300 | 25 | 227.4 |

为了便于研究激光与电弧相互作用对接头熔化特征的影响,特别设计了非熔透与熔透的双面焊试验。

图 12 为非熔透条件下,电弧电流变化对激光焊接接头形貌的影响,从激光焊缝接头形貌来看没有明

显的变化。图 13 曲线所示为电弧电流对激光熔化效率的影响规律,随着电弧电流的增加,激光焊的熔化效率只有略微的增加,当电流从 0 增大到 250 A 时,激光焊的熔化效率增加了 14.6%。

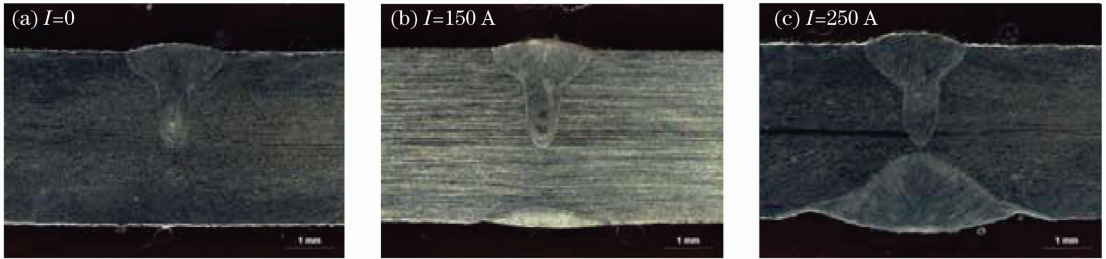


图 12 电弧电流对激光焊接接头形貌的影响 ($P=1.2 \text{ kW}$, $v=1.0 \text{ m/min}$)

Fig. 12 Effects of arc current on weld cross-section of laser welding ($P=1.2 \text{ kW}$, $v=1.0 \text{ m/min}$)

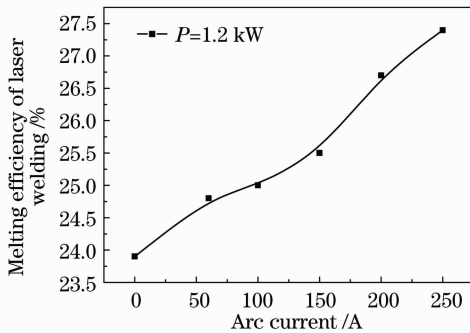


图 13 电弧电流对激光焊熔化效率的影响 ($P=1.2 \text{ kW}$, $v=1.0 \text{ m/min}$)

Fig. 13 Effects of arc current on melting efficiency of laser welding ($P=1.2 \text{ kW}$, $v=1.0 \text{ m/min}$)

图 14 为相同条件下,激光功率变化对电弧焊接接头形貌的影响,可以看出,随着激光功率的增加,电弧焊的熔深熔宽都有明显增加。从图 15 所示激光功率对电弧焊熔化效率的影响规律曲线可知,激光功率增加时,电弧焊的熔化效率显著提高。当激光功率从 0 增加到 1.6 kW 时,电弧熔化效率提高了 4

倍左右。由此可知激光对电弧焊熔化效率的影响远大于电弧对激光焊熔化效率的影响,这是由于激光-电弧双面焊中,激光对电弧具有压缩作用,使得电弧能量密度大幅度提高,从而提高电弧焊的熔化效率^[8]。而电弧对激光焊的作用主要体现在电弧预热提高材料对激光能量的吸收率,而对于不锈钢来说,材料预热与否对激光能量的吸收率影响远小于铝合金,因而可以看到不锈钢双面焊电弧对激光焊熔化效率的提高明显小于铝合金双面焊^[13]。

图 16,17 分别为全熔透条件下激光和电弧对双面焊的熔化效率的影响。可以看出,无论是改变激光功率还是电弧电流,当热输入较小时,激光-电弧双面焊的熔化效率变化不大,甚至增加热输入时熔化效率还略有下降,而当热输入增大到一定程度以后,激光-TIG 双面焊的熔化效率有显著提高。正如图 3,4 所示,当激光-TIG 双面焊的热输入提高到一定程度时,接头形貌从具有激光焊与电弧焊的混合特征转变成均匀过渡特征的这一现象相吻合。

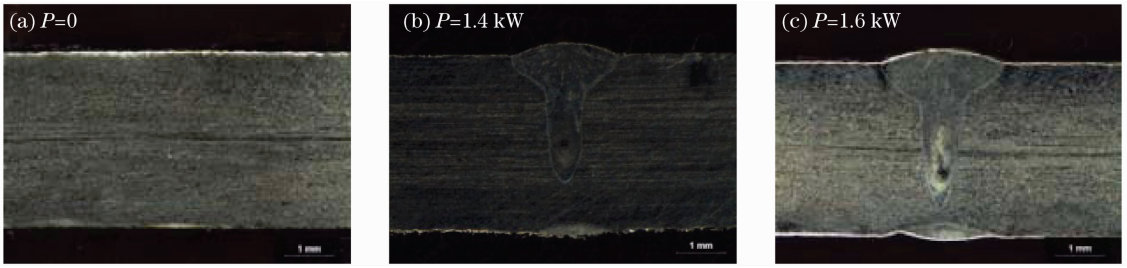


图 14 激光功率对电弧焊接头形貌的影响 ($I=60\text{ A}$, $v=1.0\text{ m/min}$)

Fig. 14 Effects of laser power on weld cross-section of arc welding ($I=60\text{ A}$, $v=1.0\text{ m/min}$)

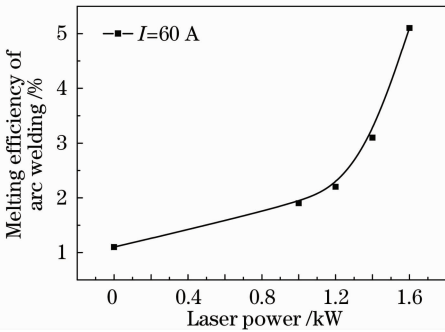


图 15 激光功率对电弧焊熔化效率的影响 ($I=60\text{ A}$, $v=1.0\text{ m/min}$)

Fig. 15 Effects of laser power on melting efficiency of laser welding ($I=60\text{ A}$, $v=1.0\text{ m/min}$)

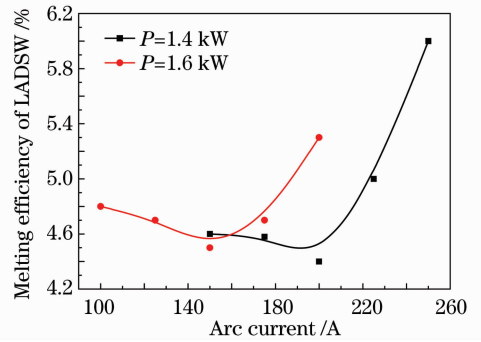


图 17 电弧电流对激光-电弧双面焊(LADSW)熔化效率的影响

Fig. 17 Effects of arc current on melting efficiency of laser-arc double-sided welding

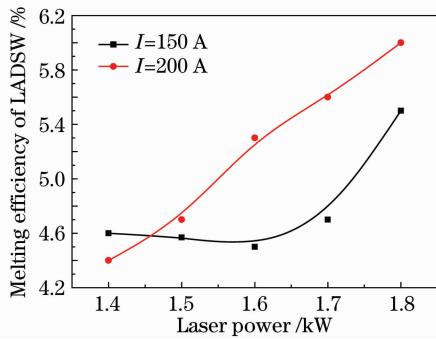


图 16 激光功率对激光-电弧双面焊(LADSW)熔化效率的影响

Fig. 16 Effects of laser power on melting efficiency of laser-arc double-sided welding

4 结 论

通过对不锈钢激光-电弧双面焊接头熔化特征的研究,得出以下结论:

1) 激光与电弧能量匹配较小时,双面焊接头呈现出激光焊与电弧焊各自的形貌特征,而当热输入超过一定范围时,接头形貌发生明显改变,焊缝两侧各自的形貌特征消失,呈现出一种均匀过渡的接头形貌。

2) 控制双面焊接头激光和电弧侧的熔宽只能

通过改变自身能量来调节。增大激光功率,可使激光侧焊缝熔宽增加,而电弧侧焊缝熔宽稍微减小,增加电弧电流,可使电弧侧焊缝熔宽增加,而对激光侧焊缝影响不明显。

3) 激光功率和电弧电流增加都对焊缝中部最小熔宽增大很明显,激光与电弧都有助于双面焊的熔透;中部最小熔宽的深度随激光功率增加而增加,而电弧电流则起到相反的作用。

4) 非熔透时,激光对电弧焊的熔化效率影响非常显著,激光功率从 0 增加到 1.6 kW 时,TIG 电弧在 60 A 电流和 1 m/min 速度下焊 4 mm 不锈钢的熔化效率提高了 4 倍左右,而电弧对激光焊的熔化效率影响很小,当电流从 0 增大到 250 A 时,1.2 kW 激光在 1 m/min 速度下焊 4 mm 不锈钢的熔化效率只增加了 14.6%;在熔透情况下,增加激光和电弧能量,激光、电弧对双面焊的熔化效率都有很大的提高。

参 考 文 献

- 1 W. M. Steen. Arc augmented laser processing of materials [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(11): 5636~5641
- 2 B. Ribic, T. A. Palmer, T. DebRoy. Problems and issues in laser-arc hybrid welding [J]. *Int. Mater. Rev.*, 2009, **54**(4): 223~244
- 3 F. O. Olsen. Hybrid Laser Arc Welding [M]. London: Taylor

- and Francis, 2009
- 4 Qin Guoliang, Lin Shangyang. Effect of laser on frequency of metal transfer and welding current in Nd:YAG laser+P-GMA hybrid welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1908~1913
- 秦国梁, 林尚扬. Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接过程中激光对熔滴过渡频率和电流的影响 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1908~1913
- 5 Lei Zhenglong, Chen Yanbin, Song Guoxiang *et al.*. Weld appearance of CO₂ laser-gas metal arc hybrid welding for ultra-low carbon bainitic steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3068~3073
- 雷正龙, 陈彦宾, 宋国祥 等. 超低碳贝氏体钢 CO₂ 激光-气体金属弧焊复合焊接成形特性 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3068~3073
- 6 B. Hu, G. den Ouden. Laser induced stabilisation of the welding arc [J]. *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2006, **10**(1): 76~81
- 7 U. Stute, R. Kling, J. Hermsdorf. Interaction between electrical arc and Nd:YAG laser radiation [J]. *Annals of the CIRP*, 2007, **56**(1): 197~200
- 8 B. Ribic, R. Rai, T. DebRoy. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in GTA/laser hybrid welding [J]. *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2008, **13**(8): 683~693
- 9 Y. B. Chen, Z. L. Lei, L. Q. Li *et al.*. Experimental study on welding characteristics of CO₂ laser TIG hybrid welding process [J]. *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2006, **11**(4): 403~411
- 10 Y. B. Chen, Y. G. Miao, L. Q. Li. Arc characteristics of laser-TIG double-side welding [J]. *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2008, **13**(5): 438~444
- 11 Chen Yanbin, Miao Yugang, Li Liqun *et al.*. Joint performance of laser-TIG double-side welded 5A06 aluminum alloy [J]. *Trans. Nonfer. Met. Soc.*, 2009, **19**(1): 26~31
- 12 Chen Yanbin, Miao Yugang, Li Liqun *et al.*. Characteristics of laser-TIG double-side welding for aluminum alloys [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1716~1720
- 陈彦宾, 苗玉刚, 李俐群 等. 铝合金激光-钨极氩弧双面焊的焊接特性 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1716~1720
- 13 Miao Yugang, Li Liqun, Chen Yanbin *et al.*. Study on heat efficiency of laser-TIG double-side welding [J]. *China Welding*, 2008, **17**(1): 64~70