

高速激光电弧复合焊接高强钢焊缝的形貌及成形机理

顾思远^{1**}, 刘政君¹, 张培磊^{1,2*}, 于治水^{1,2***}, 叶欣^{1,2}, 顾勇³

¹上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620;

²上海市激光先进制造技术协同创新中心, 上海 201620;

³上海汇众汽车制造有限公司, 上海 200122

摘要 以 3 mm 厚高强钢为试验材料, 采用光纤激光-熔化极稀有气体保护电弧复合焊接方法, 研究了焊速为 $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时激光功率与电弧电压对焊缝形貌的影响, 并与低速焊接中厚板得到的焊缝形貌进行了比较。研究表明, 增大电弧电压和激光功率均能提高焊接过程的稳定性, 获得良好的焊缝成形。在不同的热源位置下, 焊缝形貌会出现浅“Y”型和深“Y”型的区别。通过高速摄影发现, 当激光前置时, 熔滴尺寸较大, 且过渡时易发生汽化爆炸, 对熔池的冲击较大; 当电弧前置时, 匙孔稳定存在, 液态金属能沿着孔壁向下流淌, 增大熔池底部面积。在低速焊接中厚板时, 由于焊接线能量及工件的表面张力存在差异, 焊缝形貌与高速焊接薄板时得到的形貌不一致。

关键词 激光技术; 高强钢; 激光电弧复合焊; 焊缝形貌; 高速摄影; 熔滴过渡

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1202007

Appearances and Formation Mechanism of Welds in High-Strength Steels by High Speed Laser-Arc Hybrid Welding

Gu Siyuan^{1**}, Liu Zhengjun¹, Zhang Peilei^{1,2*}, Yu Zhishui^{1,2***}, Ye Xin^{1,2}, Gu Yong³

¹School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

²Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser Advanced Manufacturing Technology, Shanghai 201620, China;

³Shanghai Huizhong Automotive Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200122, China

Abstract The 3 mm thick high-strength steels are taken as test materials and the technique of fiber laser-arc hybrid welding assisted by metal inert gas is chosen. The effects of laser power and arc voltage at welding speed of $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ on weld appearances are investigated. The comparison with those weld appearances generated in low speed welding of thick plates is conducted. The research results show that the increases of laser power and arc voltage can ensure the improvement of welding stability and the obtainment of good weld formation. There exist different shallow and deep Y-type weld appearances at different heat source positions. The high-speed photography indicates that the droplet size is relatively large in the laser leading mode. In addition, it is prone to vaporization and explosion in the transfer process. Thus, the impact on molten pool are relatively strong. In contrast, in the arc leading mode, the keyholes are stable. The liquid metal flows down along the keyhole walls and thus the bottom area of molten pool increases. As for the low speed welding of thick plates, the weld appearances are not consistent with those for high speed welding of thin plates due to the differences in welding line energy and surface tension of workpieces.

Key words laser technique; high-strength steel; laser-arc hybrid welding; weld appearance; high-speed photography; droplet transfer

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-07-20; 录用日期: 2018-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(51375294, 51605276)、上海市“创新行动计划”基础研究领域项目(17JC1400600, 17JC1400601)、上海汽车工业科技发展基金会(1604)

* E-mail: peilei@sues.edu.cn; ** E-mail: m18302181668_1@163.com; *** E-mail: yu_zhishui@163.com

1 引 言

与激光焊接和传统的电弧焊不同,激光电弧复合焊接既能降低对对接间隙的敏感性,又能保证高速焊接情况下电弧的稳定性^[1-3]。激光电弧复合焊接具有焊接效率高、装配精度要求低的特点,在工业领域中的应用日渐广泛。目前应用范围较广的一种低合金高强度汽车钢板是 HR420LA,实现其在高速激光电弧复合焊接过程中的稳定焊接并减少气孔等缺陷是近年来研究者关注的重点之一。

在高强钢的激光电弧复合焊接过程中,不同的热源位置会对熔池的流动、匙孔的稳定性、熔滴过渡等产生影响,从而产生不同的焊缝形貌。Kah 等^[4]认为,在复合焊接过程中,熔池的流动是由于各种驱动力(熔滴冲击力、等离子体流等)的综合作用,焊接方向不同,各驱动力的方向也会发生改变。Bunaziv 等^[5]在试验过程中发现,激光前置时的电弧区熔宽大于电弧前置时的。这是由于电弧力作用于激光预热工件后,焊丝的润湿铺展能力得到了加强。Miao 等^[6]发现,当电弧前置时,气泡易从激光区逃逸至电弧区,但很难继续逸出至熔池外部,而当激光前置时气泡的逸出是先难后易。这主要是由于焊接方向不同,故电弧区与激光区的面积不同。李敏等^[7]研究了在不同的热源位置下,熔滴受力与过渡频率的变化。随着激光功率的增大,激光引导下的熔滴过渡频率加快,而电弧引导模式受到的影响较小。张亚亮等^[8]认为,由于熔池受力及熔滴相对熔池的绝对速度存在差别,与激光前置相比,电弧前置焊缝横截面的对中性更好,焊接过程更稳定。此外,国内外学者还对不同热源位置下的焊接稳定性、等离子体及熔滴过渡的动态特征、熔池及匙孔的受力状态等进行了研究^[9-14]。本文在高速焊接的情况下,重点研究了不同热源位置对焊缝形貌的影响规律,结合熔滴及熔池的受力情况,对形貌差异进行了分析。

2 试验方法

试验中使用美国 IPG Photonics 公司生产的 YLS-5000 型光纤激光器和芬兰 KEMPPI 公司生产的 Pulse450MIG 型焊机,通过自行研制的复合焊

接装置进行旁轴复合。试验用机器人人为德国 KUKA 公司生产的 KR60HA 型六轴机器人(德国 HIGHYAG 公司生产的 BIMO 焊接头)。试验使用频率为 5000 frame/s 的高速摄像机、背光光源(波长为 810 nm)及滤光片等拍摄焊接过程。复合焊接装置及热源布置方式如图 1 所示,其中 MIG 为熔化极稀有气体保护焊。焊缝形貌的表征如图 2 所示。

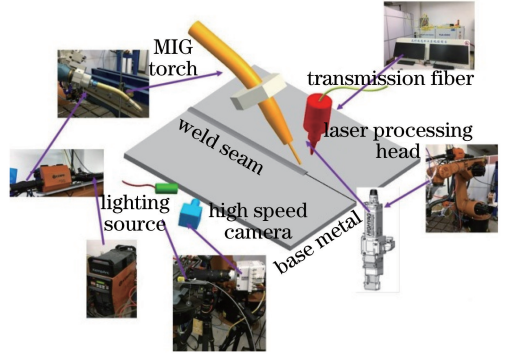


图 1 激光电弧复合焊接示意图
Fig. 1 Schematic of laser-arc hybrid welding

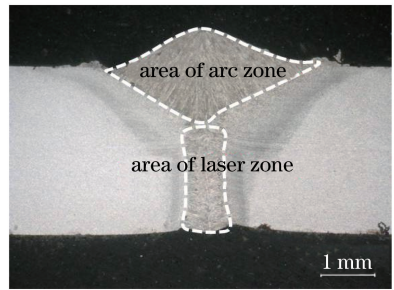


图 2 焊缝形貌示意图
Fig. 2 Schematic of weld appearance

试验材料为一种低合金高强度钢(HR420LA),尺寸为 300 mm×150 mm×3 mm。以牌号为 JM-56、直径为 1.2 mm 的焊丝 ER50-6 作为填充材料。母材与焊丝的化学成分如表 1 所示。MIG 焊枪保护气体使用体积分数为 99% 的纯氩气体,直接从焊枪喷嘴流出。同时,工件背部也通有保护气。焊接采用对接平焊,主要焊接参数如表 2 所示。焊接完成后,将试样沿着横截面切开,采用标准金相试样制备工序制成试样,用硝酸乙醇腐蚀焊缝,采用超景深显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)及其配套的能谱仪(EDS)进行焊缝形貌组织分析。

表 1 高强钢和焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of high-strength steel and wire (mass fraction, %)

Material	C	Si	Mn	Ni	Ti	Cu	Fe
HR420LA	≤0.1	≤0.5	≤1.6		≤0.15		Bal.
ER50-6	0.06-0.15	0.80-1.15	1.40-1.85	≤0.15		≤0.5	Bal.

表 2 激光-MIG 复合焊工艺参数

Table 2 Process parameters of laser-MIG hybrid welding

Welding parameter	Value
Laser power P /kW	4.2-5
Welding speed V /($m \cdot min^{-1}$)	5
Wire feed speed W /($m \cdot min^{-1}$)	9
Laser-arc distance /mm	4
Voltage U /V	21-30
Defocusing Δf /mm	+3
Shielding gas flow rate /($L \cdot min^{-1}$)	25

表 3 焊缝及横截面形貌

Table 3 Weld and cross-sectional appearance

Voltage /V	Arc-leading		laser-leading	
	Weld	Cross-section	Weld	Cross-section
21				
24				
27				
30				

3 试验结果与分析

3.1 电弧电压对焊缝形貌的影响

当激光功率为 4.4 kW 时,焊缝的表面形貌及横截面如表 3 所示,可以看出,无论采用何种热源布置方式,当电压低于 21 V 时,焊缝都难以成形。随着电压的升高,电弧热源半径增大,电弧压力减小,因此不会产生大量飞溅。此外,电压升高,电弧长度增大,也在一定程度上降低了等离子体的密度,稳定了焊接过程。

随着电弧电压的升高,两者的熔宽均呈增大的趋势,如图 3(a)所示。这是由于电弧的热源半径增大,扩大了电弧与母材的接触面积。当激光前置时,电弧作用于激光形成的熔池处,热量更易横向扩散,

熔化了更多焊缝边界的母材金属,故其焊缝熔宽大于电弧前置时的^[15]。

电弧电压对焊缝余高的影响如图 3(b)所示,可以看出,当电弧前置时焊缝余高随着电弧电压的升高先增大后减小,而当激光前置时则单调增大。当电弧电压变大时,电弧热源半径增大,电弧压力减小,液态金属聚集在熔池的上半区,增大了余高。但从表 3 中可以发现,当电压增至 30 V 时,电弧前置的焊缝表面比激光前置的更粗糙。这是由于电弧前置时产生的等离子体较少^[16],电压过大时,激光对电弧的压缩作用减弱,电弧体积膨胀导致等离子体的浓度过低,从而影响了焊接过程中电弧的稳定性,飞溅增多,余高有所降低。

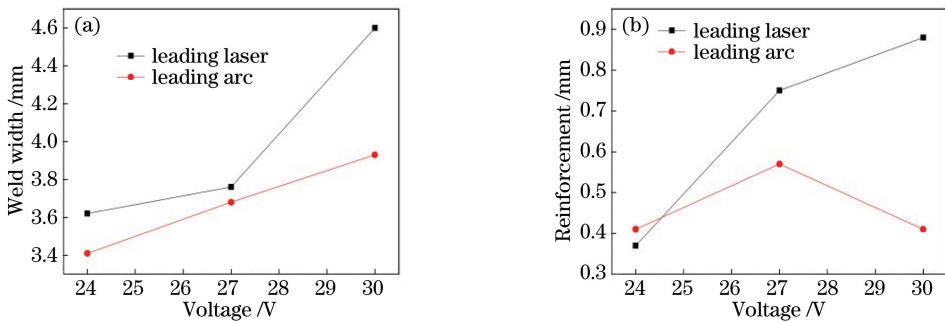


图 3 电弧电压对焊缝形貌的影响。(a)熔宽;(b)余高

Fig. 3 Effect of arc voltage on weld appearance. (a) Weld width; (b) reinforcement

3.2 激光功率对焊缝形貌的影响

表 4 所示为不同热源位置时的焊缝形貌图,可以看出,随着激光功率的增大,光致等离子体对电弧形态及焊接过程都会产生不同程度的影响。当激光前置时,由于焊速较快,电弧只能作用于熔池上部,液态金属无法向下流淌,多余的填充焊丝平铺在焊缝表面,增大了余高。当电弧前置时,激光会搅拌电弧形成的熔池,将大量熔融金属带入熔池底部,使焊缝余高减小。

不同热源位置时的焊缝横截面形貌如表 5 所示,可以看出,当激光前置时,随着激光功率的增大,电弧区和激光区的面积均先增大后减小再增大,如图 4(a)所示。当激光功率从 4.2 kW 增至 4.6 kW 时,母材吸收的能量先增大,但大都集中在焊缝的上部区域,并没有向下传递,故电弧区面积显著增大,而激光区的面积变化较小;随着激光功率的进一步增大,电弧等离子体无法有效稀释激光产生的多余光致等离子体,引起散射作用,使母材吸收的能量减

表 4 不同热源位置时的焊缝形貌

Table 4 Weld appearances at different heat source positions

Laser power /kW	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0
Laser-leading					
Arc-leading					

表 5 不同热源位置时的焊缝横截面形貌

Table 5 Cross-sectional appearances of weld at different heat source positions

Laser power /kW	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0
Laser-leading					
Arc-leading					

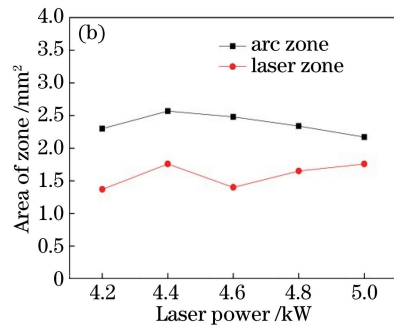
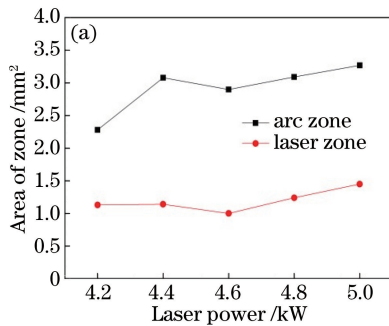


图 4 激光功率对焊缝形貌的影响。(a)激光前置;(b)电弧前置

Fig. 4 Effect of laser power on weld appearance. (a) Laser-leading; (b) arc-leading

少。此时,激光的预热作用减小,焊丝在工件上的润湿铺展能力减弱,焊缝熔宽减小,余高增大。当激光功率由 4.6 kW 增至 5.0 kW 时,其热能使等离子体向外膨胀^[17],稳定了激光匙孔的尺寸,并重新压缩、吸引电弧,增强了电弧对于熔池的作用效果。

当电弧前置时,如表 5 所示,随着激光功率由 4.2 kW 增至 4.6 kW 时,电弧区与激光区面积均先增大后减小,如图 4(b)所示。由于电弧的预热作用,激光作用在熔池处,不仅能熔化更多母材,还能驱使焊缝上半部分的液态金属向下半部分流动;但当激光功率变为 4.6 kW 时,多余的光致等离子体将会阻碍母材吸收激光能量,降低母材金属的熔化量,熔池流动性变差;随着激光功率的进一步增大,

与激光前置时相似,增大的热能使得等离子体向外膨胀,减轻了其对激光的散射作用。此时,焊缝上部区域的液态金属在稳定匙孔的驱动下逐渐向下流淌,激光区面积增大而电弧区面积减小。

图 5 所示为热源位置不同时焊缝总面积随激光功率的变化。在 $P=4.6$ kW 时,激光前置和电弧前置下的焊缝总面积都减小,这是由前文所分析的光致等离子体对激光能量的散射作用所造成的。当 P 小于 4.6 kW 时,激光前置的焊缝总面积要小于电弧前置的,而随着激光功率的进一步增大,情况则相反。分析认为,在高焊速下,当激光功率较小时,与激光前置相比,电弧前置更有利于工件的熔透,有多余的能量熔化侧壁的母材;当激

光功率较大时,即使没有电弧的预热作用,激光能量也足以熔透工件。此时,电弧作用于激光形成的熔池之后,焊缝边界处更多的母材金属被融化,增大了焊缝总面积。而当电弧前置时,其预热作用使得母材吸收的能量过多,造成一部分母材气化,从而减小了焊缝上半部分的面积。

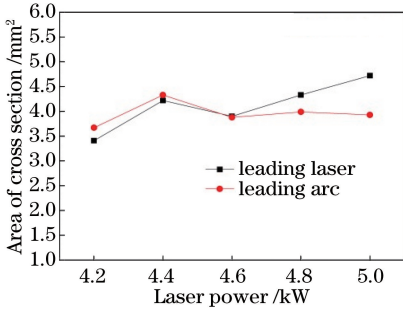


图 5 不同热源位置时的焊缝总面积

Fig. 5 Total area of weld at different heat source positions

3.3 热源位置对焊缝形貌的影响

由表 5 可知,激光前置的焊缝横截面都属于深“Y”型,而电弧前置则属于浅“Y”型。这主要是由于

两者的熔池和熔滴受力情况不同。当激光前置时,受到向前焊速的影响,激光与工件作用而产生的金属蒸气向后相对运动,对后置电弧的熔滴过渡产生一个向上的推力,阻碍其过渡,如图 6 所示。因此,激光前置时的熔滴过渡形式介于短路过渡与粗滴过渡之间,过渡频率较小,如表 6 所示,其中 $P = 4.8 \text{ kW}$, $W = 9 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $V = 5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $U = 24 \text{ V}$, $\Delta f = +3 \text{ mm}$, T 代表起始时间。当电弧前置时,激光产生的金属蒸气主要对熔滴进行热辐射,减小了其表面张力,有利于熔滴细化^[18],增大了过渡频率。

表 6 不同热源位置时激光电弧复合焊接的熔滴过渡图像
Table 6 Droplet transfer images in laser-arc hybrid welding process at different heat source positions

Time /ms	T+2	T+4	T+6	T+8	T+10
Laser-leading					
Arc-leading					

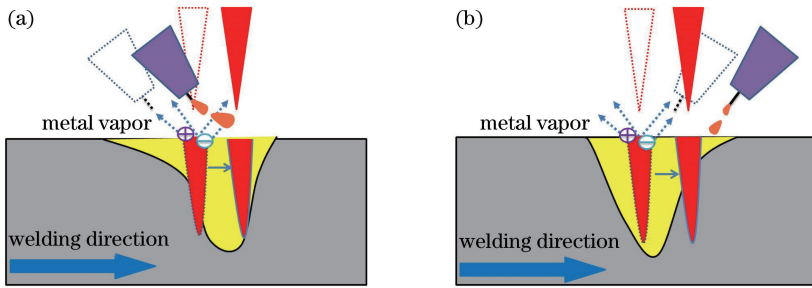


图 6 不同热源位置时金属蒸气对熔滴过渡的影响。(a)激光前置;(b)电弧前置

Fig. 6 Effect of metal vapor on droplet transfer at different heat source positions. (a) Laser-leading; (b) arc-leading

当激光前置时,如图 7(a)所示,滞留的金属蒸气 F_{RL} 产生反向的作用力,电磁收缩力 F_{em} 与焊丝轴线成一个夹角 α ,这些都会阻碍熔滴过渡,使其尺寸逐渐增大(直径大于焊丝的),重力 F_g 在熔滴

过渡的过程中起到了主导作用。当电弧前置时,如图 7(b)所示,金属蒸气 F_{RL} 的反作用力的影响较小,熔滴尺寸与焊丝直径相近,则电磁收缩力 F_{em} 对熔滴过渡起主要作用。由于熔滴尺寸较大,

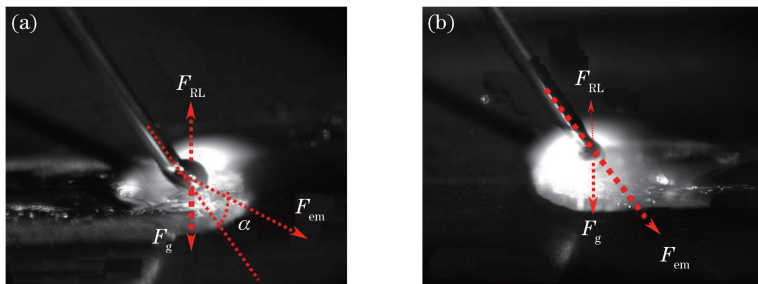


图 7 不同热源位置时熔滴的受力情况。(a)激光前置;(b)电弧前置

Fig. 7 Schematic of various forces on droplet at different heat source positions. (a) Laser-leading; (b) arc-leading

激光前置时熔滴的动量较大且过渡时易发生汽化爆炸,会冲击熔池并产生振荡,对扩大电弧区的面积更有利。

在整个焊接过程中,匙孔的稳定性对熔池底部的能量吸收有着重要影响。当激光前置时,激光直接作用在工件表面,且作用时间较短,形成的匙孔尺寸较小,如图 8(a)~(d)所示。这会导致金属蒸气

难以从匙孔内逸出,从而冲击匙孔壁,使其崩塌。熔滴对熔池的冲击力较大,容易造成湍流,使得匙孔壁失稳,匙孔闭合,熔池底部吸收的能量减小,激光区面积减小。当电弧前置时,由于预热作用,激光入射于熔池根部,形成了较为稳定的匙孔,液态金属能顺着匙孔壁向熔池底部流淌,增大了激光区面积,如图 8(e)~(g)所示。

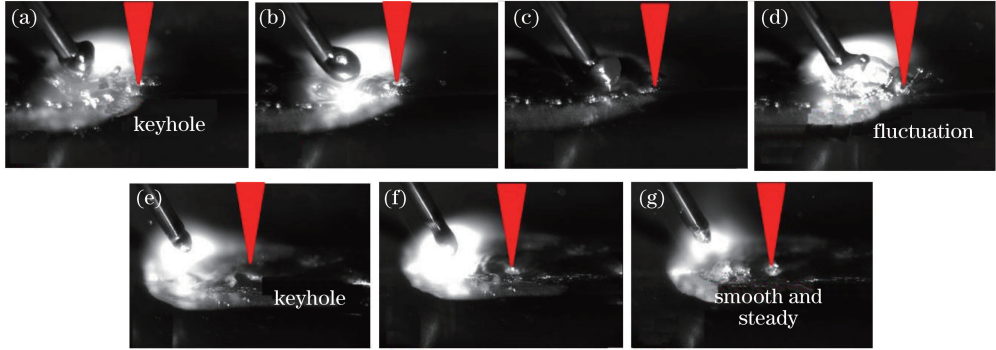


图 8 不同热源位置时匙孔的特征。(a)~(d)激光前置;(e)~(g)电弧前置

Fig. 8 Characteristics of keyhole at different heat source positions. (a)-(d) Laser-leading; (e)-(g) arc-leading

3.4 高速焊薄板与低速焊中厚板的焊缝形貌对比

在不同的引导方式下,以 $V=0.8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率焊接 6.6 mm 厚的高强钢时,激光前置与电弧前置的接头形貌分别为“鸡尾酒杯状”(浅“Y”型)和锥形(深“Y”型)^[19]。这说明高速焊接薄板与低速焊接中厚板时得到的焊缝形貌相反,如表 7 所示。

在低焊速下,如图 9(a)所示,当电弧前置时,电弧的预热时间长,范围广,液态金属在电弧力和熔滴冲力的作用下流向熔池内部,且中厚板的熔池-母材界面长度较长,对液态金属的承载能力加强^[20],能在吸收较大焊接线能量的同时保持匙孔壁的稳定。当激光前置时,匙孔能稳定地存在于熔池底部,驱使大量填充金属和熔化的母材沿着孔壁流向焊缝底

表 7 高速焊薄板与低速焊中厚板的焊缝形貌对比

Table 7 Comparison of weld appearance between in high-speed welding of thin plates and in low-speed welding of thick plates

Welding parameter	Laser-leading	Arc-leading
$P=2.5 \text{ kW}$, $V=0.8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$		
$P=4.6 \text{ kW}$, $V=5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$		

部。而电弧则作用于激光形成的熔池处,焊丝能更好地润湿铺展于工件表面,增大了熔宽。在高焊速

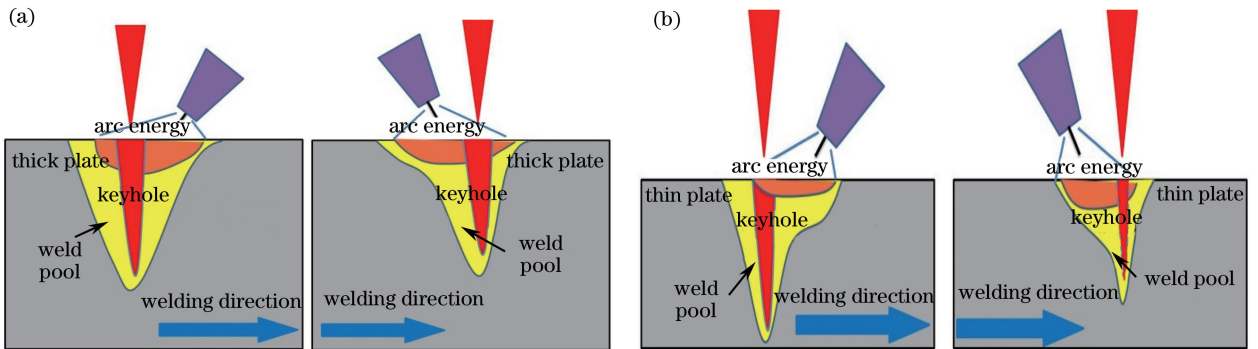


图 9 高速焊薄板与低速焊中厚板的区别。(a)厚板;(b)薄板

Fig. 9 Difference between high-speed welding of thin plates and low-speed welding of thick plates.

(a) Thick plates; (b) thin plates

下,如图 9(b)所示,当电弧前置时,电弧的预热作用显著减小,熔池上半区的流动性变差。随后加入的激光能形成稳定存在的匙孔,扩大了焊缝下半区的面积,但由于焊接线能量较小,对上半区的影响较小。当激光前置时,熔滴尺寸较大,对熔池产生冲击力,扩大了电弧区面积。但由于焊接线能量较小且匙孔形态不稳定,无法驱使熔池上半区的熔融金属向下流动。

3.5 焊接接头的力学性能测试

图 10 所示为焊接接头横截面的硬度分布。在不同的热源位置下,焊缝硬度都随电弧区向激光区的过渡而减小,但均大于母材硬度。这是由于焊速过快,焊丝成分(Mn、Si 等)没有充分的时间向下流淌,激光区的固溶强化效果比电弧区的弱,故硬度较低,如图 11 所示。而当激光前置时,其硬度降低的幅度很大。这主要是由于此时匙孔的存在不稳定,液态金属较难向下流淌,焊丝成分(Mn、Si 等)集中在焊缝上部;而当电弧前置时,激光作用在后,起到

了搅拌熔池的作用,增强了焊缝上下区域的均匀性,如图 12 所示。此外,当激光前置时,焊缝下半区多为铁素体魏氏组织(浮凸现象),晶粒粗大;而当电弧前置时,焊缝下半区多为马氏体组织,晶粒细小。因此,综合分析焊缝元素分布及显微组织图,可以得到焊接接头硬度分布产生差异的原因。

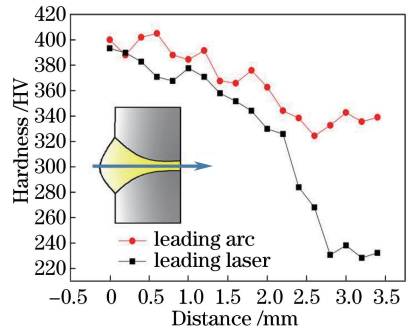


图 10 不同热源位置时横截面焊缝的硬度分布
Fig. 10 Microhardness distributions of cross-sectional weld at different heat source positions

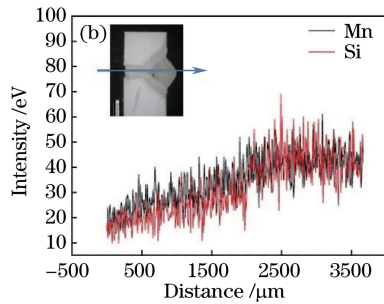
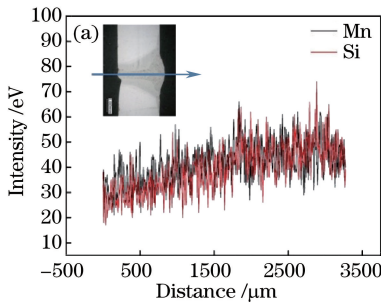


图 11 焊缝线扫描分析结果。(a)电弧前置;(b)激光前置

Fig. 11 Weld line scan results. (a) Arc-leading; (b) laser-leading

在按照国标 GB/T 2651—2008 进行拉伸试验的过程中,发现无论采用何种工艺参数,断裂均发生在母材上,如图 13(a)所示,其中 R 为半径,单位为 mm。这反映了激光-电弧复合焊接接头良好的力学性能。在后续试验中,根据冲击试样的设计原理(GB/T 2650—89),对拉伸试样进行了重新设计,确保断裂位置出现在焊缝处,如图 13(b)所示。焊缝接头的抗拉强度均高于母材的,如图 14 所示,这是由于焊丝元素溶于焊缝组织中^[21],提高了钢的硬度和强度。

4 结 论

以 3 mm 厚高强钢为试验材料,采用激光电弧复合焊接的手段,研究了高速焊接时激光功率与电弧电压对焊缝形貌的影响,并与低速焊接中厚板得到的焊缝形貌进行了比较,结果如下。

1) 随着电弧电压的增大,焊缝形貌趋于良好;但过高的电压($U=30$ V)导致激光对电弧的压缩作用减弱,且会降低电弧等离子体的浓度,导致焊接过程出现不稳定。

2) 随着激光功率由 4.2 kW 增至 5.0 kW,焊缝上下区域的面积都会相应变化。当激光前置时,金属蒸气区域存在滞留时间,对后置电弧的熔滴过渡产生反向的作用力,导致其尺寸变大,对熔池的冲击作用也增强,电弧区面积增大;当电弧前置时,激光作用于熔池中,匙孔的尺寸较为稳定,液态金属能顺着孔壁向熔池底部流淌,增大了激光区的面积。

3) 高速($V=5$ m·min⁻¹)焊接薄板时,其焊接线能量要远远小于低速($V=0.8$ m·min⁻¹)焊接中厚板的,熔池流动的剧烈程度也较弱。此外,中厚板的表面张力大于薄板的,其在吸收大量焊接线能量的同时能够维持匙孔壁的稳定性的。

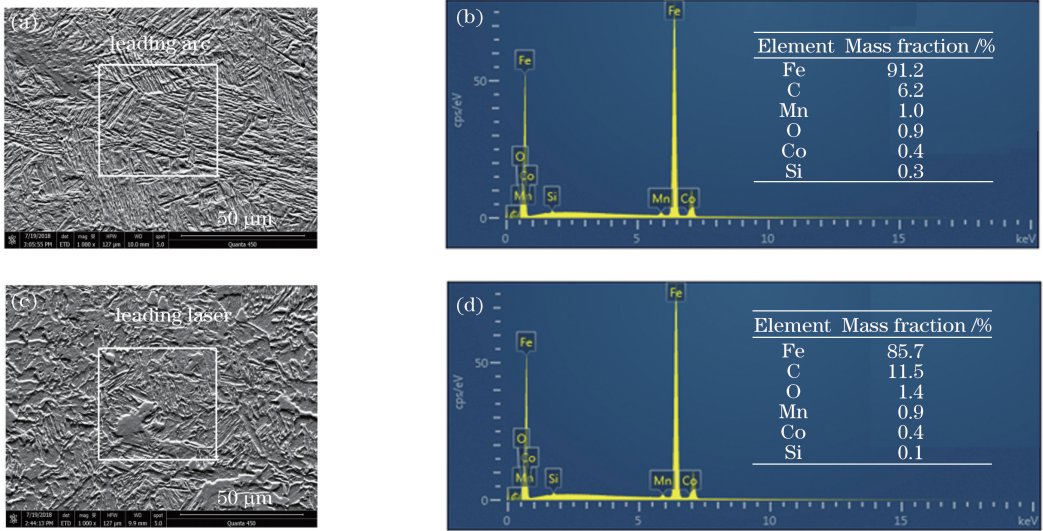


图 12 不同热源位置时焊缝下半区域(激光区)的成分分析结果。(a)电弧前置,电子图像;
(b)电弧前置,能谱图;(c)激光前置,电子图像;(d)激光前置,能谱图

Fig. 12 Component analysis results of bottom area (laser area) of weld at different heat source positions. (a) Arc-leading, electron image; (b) arc-leading, energy spectrum; (c) laser-leading, electron image; (d) laser-leading, energy spectrum

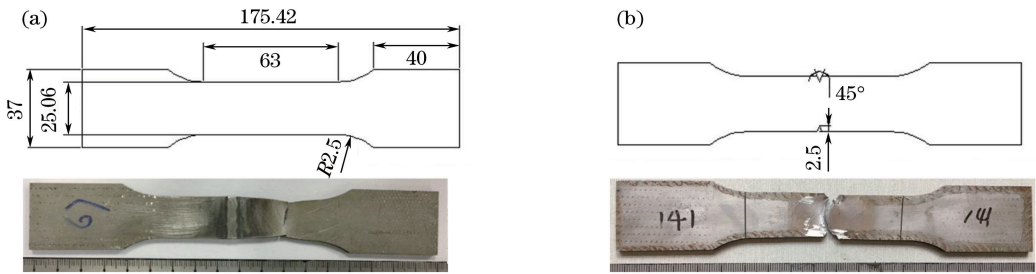


图 13 拉伸试样。(a)断裂在母材;(b)断裂在焊缝

Fig. 13 Tensile samples. (a) Fracture at base metal; (b) fracture at weld

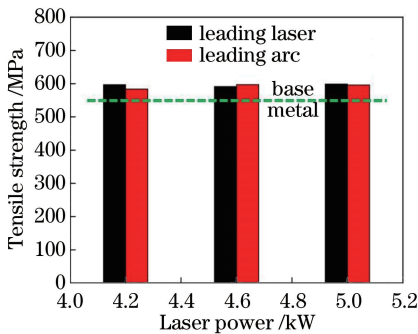


图 14 不同热源位置时焊缝试样的抗拉强度

Fig. 14 Tensile strength of weld sample at different heat source positions

4) Mn、Si 等焊丝元素能溶于焊缝组织中,改善了焊缝的力学性能,其硬度和抗拉强度分别能达到 404 HV 和 598 MPa,均高于母材的。

参 考 文 献

[1] Liu M H. Research on laser-arc hybrid welding

technology of high strength steels [D]. Jilin: Changchun University of Science and Technology, 2011.

刘明辉. 高强钢激光-电弧复合焊接技术研究[D]. 吉林: 长春理工大学, 2011.

[2] Moradi M, Ghoreishi M, Frostevarg J, *et al.* An investigation on stability of laser hybrid arc welding [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(4): 481-487.

[3] Li X. Laser-arc hybrid welding performances of high strength steel[D]. Liaoning: Shenyang University of Technology, 2015.

李响. 高强钢的激光-电弧复合焊接性能研究[D]. 辽宁: 沈阳工业大学, 2015.

[4] Kah P, Salminen A, Martikainen J. The effect of the relative location of laser beam and arc in different hybrid welding process [J]. *Mechanika*, 2010, 3 (83): 68-74.

[5] Bunaziv I, Akselsen O M, Salminen A, *et al.* Fiber laser-laser-MIG hybrid welding of 5 mm 5083 aluminum

- alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 233: 107-114.
- [6] Miao H B, Yu G, He X L, *et al.* Comparative study of hybrid laser-MIG leading configuration on porosity in aluminum alloy bead-on-plate welding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(5/6/7/8): 2681-2688.
- [7] Li M, Zhang W, Hua X M, *et al.* Investigation of plasma and metal transfer dynamic behavior during fiber laser GMAW-P hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0402008.
李敏, 张旺, 华学明, 等. 光纤激光与 GMAW-P 复合焊接等离子体及熔滴过渡动态特征研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0402008.
- [8] Zhang Y L, Liu J, Shi Y, *et al.* Study on the influence of different laser-MIG arc hybrid welding methods on the welding quality of aluminum alloy [J]. *Applied Laser*, 2017, 37(2): 229-233.
张亚亮, 刘佳, 石岩, 等. 激光-电弧复合焊不同引导方式对其焊接成形质量的影响研究[J]. *应用激光*, 2017, 37(2): 229-233.
- [9] Gao Z M, Jiang P, Wang C M, *et al.* Study on droplet transfer and weld quality in laser-MIG hybrid welding of 316L stainless steel[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(1/2/3/4): 483-493.
- [10] Wang L, Li X W, Gao M, *et al.* Stabilization mechanism and weld morphological features of fiber laser-arc hybrid welding of pure copper[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 27: 207-213.
- [11] Liu F D, Zhang H, Du S F, *et al.* Influence of laser power on arc and droplet behaviors in droplets on CO₂ laser-MAG arc hybrid welding [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(4): 75-82.
刘凤德, 张宏, 杜劭峰, 等. 激光功率对 CO₂ 激光-MAG 电弧复合焊电弧与熔滴行为的影响[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(4): 75-82.
- [12] Liu S Y, Zhang H, Shi Y, *et al.* Effects of process parameters on droplet transfer and bead shape in CO₂-MAG hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(12): 3172-3179.
刘双宇, 张宏, 石岩, 等. CO₂ 激光-MAG 电弧复合焊接工艺参数对熔滴过渡特征和焊缝形貌的影响[J]. *中国激光*, 2010, 37(12): 3172-3179.
- [13] He S, Chen H, Chen Y, *et al.* Effects of laser power on droplet transfer behaviour in laser-MAG hybrid welding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021408.
何双, 陈辉, 陈勇, 等. 激光功率对激光-MAG 复合熔滴过渡行为的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021408.
- [14] Hu L H, Huang J, Wu Y X, *et al.* Study on coupling mechanism and metal transfer in laser double-wire MIG arc hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0602005.
胡连海, 黄坚, 吴毅雄, 等. 激光-双 MIG 电弧复合焊耦合机制及熔滴过渡研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0602005.
- [15] Cui L, He D Y, Li X Y, *et al.* Effects of welding direction on weld shape of fiber laser-MIG hybrid welded titanium alloys [J]. *Chinese Journal of 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.
- [16] Zhang W, Hua X M, Liao W, *et al.* The effect of the welding direction on the plasma and metal transfer behavior of CO₂ laser + GMAW-P hybrid welding processes [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 58: 102-108.
- [17] Yan J. Study on the process characteristics, metallurgical defects and joint properties during fiber laser-arc welding of high strength aluminum alloys [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
严军. 光纤激光-电弧复合焊接高强铝合金工艺、缺陷产生与质量控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [18] Xue C, Zhang H, Yang R H. Effects of the arc energy on droplet transfer and bead shape in Nd:YAG-MAG hybrid welding [J]. *Applied Laser*, 2015, 35(3): 344-350.
薛川, 张宏, 杨日辉. Nd:YAG 激光-MAG 电弧复合焊电弧能量对熔滴过渡特征和焊缝形貌的影响[J]. *应用激光*, 2015, 35(3): 344-350.
- [19] Liu S Y, Li Y Q, Liu F D, *et al.* Effects of relative positioning of energy sources on weld integrity for hybrid laser arc welding [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 81: 87-96.
- [20] Gao M, Xiong Z, Zeng X Y, *et al.* Experimental study on critical speed of laser-arc hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(9): 2438-2442.
高明, 熊征, 曾晓雁, 等. 激光-电弧复合焊接临界速度规律研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(9): 2438-2442.
- [21] Casalino G, Mortello M, Leo P, *et al.* Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy[J]. *Materials & Design*, 2014, 61: 191-198.