

# 高强钢激光-MIG 复合焊对接间隙下的焊缝成形机理

刘政君<sup>1</sup>, 顾思远<sup>1</sup>, 张培磊<sup>1,2\*</sup>, 于治水<sup>1,2</sup>, 叶欣<sup>1,2</sup>, 顾勇<sup>3</sup>

<sup>1</sup>上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620;

<sup>2</sup>上海市激光先进制造技术协同创新中心, 上海 201620;

<sup>3</sup>上海汇众汽车制造有限公司, 上海 200122

**摘要** 采用光纤激光-熔化极稀有气体保护(MIG)复合焊对不同对接间隙下的 3 mm 厚低合金高强钢进行焊接。在焊接速度恒定的条件下,研究了不同对接间隙下焊缝的成形过程,并与零间隙下相同工艺参数的激光-MIG 复合焊的焊缝形貌进行对比。结果表明:在有对接间隙时,焊缝及其热影响区的上下宽度基本一致(呈 U 形),而在零间隙下,焊缝及其热影响区的宽度均呈上宽下窄(Y 形)的形态。焊缝成形机理如下:在激光-MIG 复合焊进行有对接间隙的焊接时,电弧等离子体的形态有三种不同的变化(与任一侧试板起弧燃弧形成的“分叉电弧”以及与两试板同时起弧燃弧形成的“十字电弧”),电弧的三种形态不断变化,形成“摆动”态;“摆动”态电弧等离子体的作用是预热和熔化工件侧壁,激光热源作用在熔池上起到加大熔深、稳定电弧和消除电弧热源导致的侧壁未熔合的作用;对接间隙下电弧热源作用的范围较大,使得母材受热更加均匀;与零间隙焊缝相比,有间隙下的焊缝组织更均匀。

**关键词** 激光技术; 对接间隙; 高强钢; 激光电弧复合焊; 高速摄影; 电弧等离子体形态

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0902006

## Welding Seam Forming Mechanism of High-Strength Steel Laser-Metal Inert Gas Hybrid Welding with Butt Gap

Liu Zhengjun<sup>1</sup>, Gu Siyuan<sup>1</sup>, Zhang Peilei<sup>1,2\*</sup>, Yu Zhishui<sup>1,2</sup>, Ye Xin<sup>1,2</sup>, Gu Yong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

<sup>2</sup>Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser Advanced Manufacturing Technology, Shanghai 201620, China;

<sup>3</sup>Shanghai Huizhong Automotive Manufacturing Co., Ltd, Shanghai 200122, China

**Abstract** In this study, 3-mm thick low-alloy high-strength steels with different butt gaps were welded by optical fiber laser-metal inert gas (MIG) protection hybrid welding. The forming processes of weld seams with different butt gaps at a constant welding speed were studied and the formed shapes were compared with the morphology of laser-MIG hybrid welding with the same process parameters under zero gap conditions. The results demonstrate that the upper and lower widths of the weld seam and its heat-affected zone are basically same under butt gaps (U-shaped), while the weld-seam width and its heat-affected zone are up-wide and down-narrow under zero-gap (Y-shaped) conditions. The formation mechanism of weld seams is as follows: when laser-MIG hybrid welding is conducted with a butt gap, three different arc plasma shapes exist, i. e. bifurcated arc shapes formed by arc striking/arcing with either side of the test plate and the cross arc shapes formed by arc striking/arcing with both test plates at the same time. The three forms of arc shapes change continuously to form a swing arc pattern. The effect of the swing arc plasma is to preheat and melt the side wall of the workpieces. The laser heat source operates on the molten pool to increase the penetration, stabilize the arc, and eliminate incomplete fusion of the side wall caused by the arc heat source. The arc heat source with a butt gap has a large effective range, and the base metal is heated more evenly. The microstructures of the butt gap welds are more homogeneous than that of the zero-gap welding seams.

**Key words** laser technique; butt gap; high-strength steel; laser-arc hybrid welding; high speed photography; arc plasma shape

收稿日期: 2019-01-25; 修回日期: 2019-05-10; 录用日期: 2019-05-22

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(1604)

\* E-mail: peilei@sues.edu.cn

## 1 引言

激光电弧复合焊是结合了激光与电弧各自优点的一种极具潜力的焊接方法,目前多数研究是关于激光-熔化极稀有气体保护(MIG)复合焊的应用,该焊接方法充分地利用了激光能量在加大熔深方面的优势<sup>[1-4]</sup>,但人们对激光电弧复合焊在有对接间隙情况下的研究比较少。

在间隙搭桥焊接的研究中,焊接间隙的尺寸直接影响到焊接过程以及焊缝形貌,陈根余等<sup>[5]</sup>采用激光焊焊接 1.6 mm 厚 B340/590DP 双相高强度钢时发现,在合适的焊接工艺参数下,当对接间隙小于板厚的 18%(约为光斑直径的 57.6%)时,可以得到焊缝成形良好、热影响区窄的焊缝,且明确指出了激光焊对接焊间隙的控制范围。高明等<sup>[6]</sup>在对激光-电弧复合焊的坡口间隙桥接能力进行研究后,获得了成形良好的焊缝的接头间隙范围:板厚为 4 mm 时,接头间隙范围为 0.5~1 mm;板厚为 6 mm 时,接头间隙范围为 0.6~1.2 mm;此外,他还认为电弧电流能够同时改变电弧压力、熔池重力、母材和填充材料的熔化量,以及坡口间隙两边熔化母材的熔合状况,并认为电弧电流是提高复合焊可焊间隙量的关键因素。Lamas 等<sup>[7]</sup>对比了激光-脉冲 MIG 电弧复合焊与激光-冷金属过渡(CMT)复合焊的间隙搭桥能力,分析了焊缝的成形情况,发现随着间隙宽度增大,激光-CMT 复合焊的成形好于激光-脉冲 MIG 电弧复合焊。张洲等<sup>[8]</sup>在间隙为 0.5 mm 的条件下对 1 mm 厚不锈钢进行对接焊,焊速可以达到 12 m/min。Wahba 等<sup>[9]</sup>研究了 2.5 mm 间隙厚板的单道焊接成形,预先在间隙处添加了规格相同的碎焊丝,这些碎焊丝作为激光和电弧作用介质,形成了成形良好的焊道。上述对存在对接间隙的激光电弧复合焊的研究均未明确其成形机理,本文结合高速摄影与焊缝成形,探究对接间隙条件下激光-MIG 电弧复合焊的成形机理,以及对接间隙对焊缝成形的影响。

## 2 试验方法

采用美国 IPG Photonics 公司的 IPG YLS-5000 型光纤激光器、芬兰 KEMPPI 公司的 KempArc 450MIG 型焊机、德国 TBI 公司的 RM 42 W 水冷式 MIG 焊枪,通过自行研制的复合焊接装置进行旁轴复合焊接试验。激光波长为 1067 nm,工作模式为连

续波,聚焦点光斑直径为 0.42 mm,光束质量为 0.4 mm·mrad。试验用机器人德国 KUKA 公司的 KR 60 HA 型六轴机器人(搭配德国 HIGHYAG 公司的 BIMO 激光焊接头)。采用美国 Vision Research 公司的 Phantom 高速摄像机(拍摄频率为 5000 frame/s)、芬兰 Cavitax 公司的 Cavilux 激光背光源(波长为 640 nm)及滤光片等对焊接过程进行拍摄。复合焊接装置以及热源布置方式(焊接时,电弧在前激光在后)如图 1 所示。

试验材料为低合金高强度钢(HR420LA),其尺寸为 200 mm×125 mm×3 mm。采用直径 1.2 mm 的牌号为 JM-56 的镀铜高强钢焊丝作为填充材料。母材与焊丝的化学成分如表 1 所示。MIG 焊保护气体采用体积分数为 99.99% 的纯氩气。焊接采用有对接间隙的平焊,在三组(A、B、C)不同工艺参数下进行激光-MIG 复合焊,分别标记为试验 A<sub>0.5 mm</sub> 和 A<sub>0.5 mm</sub>、B<sub>0.5 mm</sub> 和 B<sub>1.0 mm</sub>、C<sub>0.5 mm</sub> 和 C<sub>1.5 mm</sub>,字母右下角数值表示间隙值,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,用体积分数为 4% 的硝酸酒精腐蚀液腐蚀焊缝,采用日本 KEYENCE 公司的 VHX-5000 型超景深显微镜(OM)和捷克 Tescan 公司的 VEGA3 型扫描电子显微镜(SEM)观察焊缝的形貌。

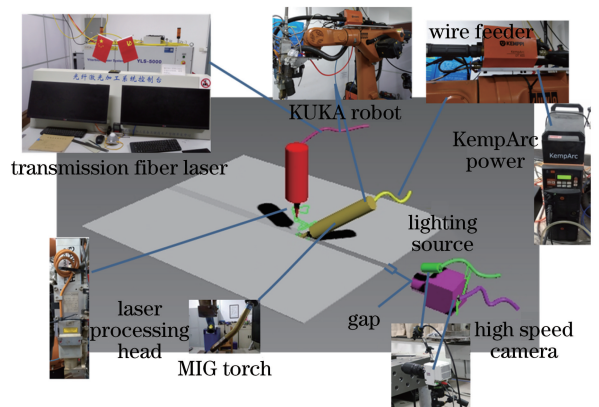


图 1 对接间隙下激光-MIG 复合焊设备及热源布置方式  
Fig. 1 Schematics of laser-MIG hybrid welding setup with butt gap and heat source

## 3 试验结果与分析

### 3.1 对接间隙对焊缝形貌的影响

为了研究间隙尺寸对焊缝成形的影响,分别采用不同间隙下(0.5, 1.0, 1.5 mm)的合适的焊接工艺参数对零间隙焊板施焊,对比分析其形貌异同点。

表 1 高强钢和焊丝的化学成分

Table 1 Chemical compositions of high-strength steel and JM-56 wire

Material	Mass fraction /%							
	C	Si	Mn	Ni	Ti	Nb	Cu	Fe
HR420LA	≤0.1	≤0.5	≤1.6		≤0.15	≤0.009		Bal.
JM-56	0.06-0.15	0.8-1.15	1.40-1.85	≤0.15			≤0.5	Bal.

表 2 不同对接间隙下激光-MIG 复合焊的工艺参数

Table 2 Welding parameters of laser-MIG hybrid welding with different butt gaps

Parameter	A <sub>0 mm</sub> and A <sub>0.5 mm</sub>	B <sub>0 mm</sub> and B <sub>1.0 mm</sub>	C <sub>0 mm</sub> and C <sub>1.5 mm</sub>
Laser power /W	2000	4000	4900
Welding speed / (m·min <sup>-1</sup> )	2	2	2
Wire feeding velocity / (m·min <sup>-1</sup> )	4.5	10	16
Voltage /V	16	16	24
Defocus amount /mm	0	0	0
Shielding gas flow rate / (L·min <sup>-1</sup> )	15	15	15
Distance of laser and wire /mm	2.5	1.5	2.5
Angle of welding torch / (°)	55	35	25
Welding wire extension /mm	15	20	25

对比在不同焊接间隙、相同工艺参数下的焊缝(表 3)可以发现:不同间隙下成形良好的焊接工艺参数在焊接零间隙时都可以成形,且都可以焊透;零间隙焊缝上表面成形不均匀,焊缝背面有未熔合现象,而有间隙情况下焊缝上表面和下表面的成形都比较平坦均匀;零间隙下焊缝的余高比有间隙焊缝的余高大,有间隙情况下焊缝成形的曲率较小;零间隙焊缝的背部余高小于有间隙焊缝的背部余高,有间隙情况下焊缝的成形较好,而零间隙焊缝的焊根熔合较差;相同工艺参数下,零间隙焊缝与常规激光-MIG 电弧复合焊的焊缝截面成形一致,焊缝及热影响区上下宽度不同,呈现出上宽下窄的 Y 形,而有对接间隙的焊缝及热影响区的上下宽度基本一致,呈 U 形。

### 3.2 激光-MIG 复合焊的成形机理

#### 3.2.1 从焊接工艺角度分析

已有的研究大部分都集中在激光-MIG 复合焊的搭桥能力上,少有人针对大间隙条件下激光-MIG 复合焊的成形机理以及间隙对激光-MIG 复合焊的影响进行研究。激光-MIG 复合焊焊接过程的电弧比较稳定是因为激光加热熔池产生金属蒸气为电弧燃烧提供了导电通道,提高了焊接电弧的稳定性<sup>[10-12]</sup>。本研究获得了三种间隙下激光-MIG 复合焊的高速摄影图像,如图 2 所示。对接间隙的引入导致激光不能直接作用在工件侧壁(激光焦点处的光斑直径为 0.42 mm,小于间隙宽度 G<sub>w</sub>),且起弧、燃弧条件发生了较大变化,电弧的起弧、燃弧方向与

焊丝送入方向不一致(零间隙下电弧起弧、燃弧方向与焊丝送入方向是一致的),这导致电弧的起弧和燃弧难度增大,降低了电弧的稳定性,从而导致高焊速、大间隙下的激光-MIG 复合焊焊缝难以成形,以及焊接过程发生不稳定现象。

表 3 不同间隙下激光-MIG 复合焊焊缝的形貌

Table 3 Morphologies of laser-MIG hybrid welding seams with different butt gaps

Code	Upper surface morphology	Lower surface morphology	Section morphology
A <sub>0 mm</sub>			
A <sub>0.5 mm</sub>			
B <sub>0 mm</sub>			
B <sub>1.0 mm</sub>			
C <sub>0 mm</sub>			
C <sub>1.5 mm</sub>			



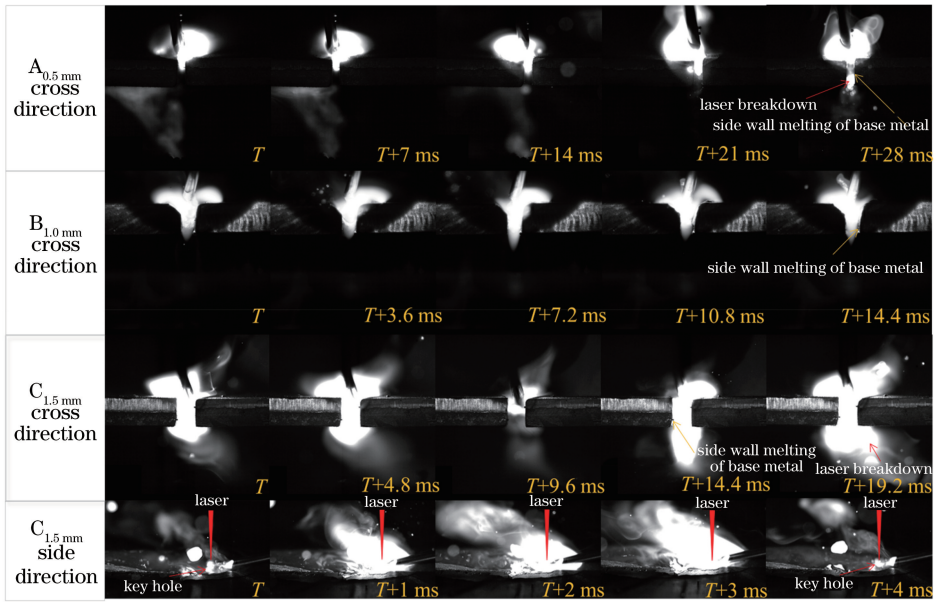


图 2 不同对接间隙下激光-MIG 复合焊时电弧形态的高速摄影图片

Fig. 2 Arc shape high speed photographs of laser-MIG arc hybrid welding with different butt gaps

图 2 中的  $T$  为时间原点, 观察图 2 可以发现: 在 0.5 mm 间隙下, 电弧的纵向长度较短, 但是由于对接间隙较小, 激光加热熔池不仅可以得到较大的熔深, 还可以通过加热熔池熔化工件侧壁; 在 1.0 mm 和 1.5 mm 间隙下, 电弧的纵向长度较长, 可以直接作用在工件侧壁上, 对工件侧壁进行预热和熔化。此外, 对接间隙可对电弧等离子体起导向作用, 增大电弧在熔深方向的作用范围。激光和焊丝始终位于对接间隙的中线上, 不同间隙下的激光-MIG 复合焊接过程

中, MIG 电弧都有三种形态, 如图 3 所示, 分别是与左侧或右侧试板起弧并燃弧形成的“分叉电弧”(电弧先与起弧能量最低的一侧试板起弧并燃弧, 待熔化此侧后再与另一侧试板起弧燃弧) 和与两侧试板同时起弧燃弧形成的“十字电弧”(理想状态)。随着电弧形态的不断变化, 形成了电弧的“摆动”态, “摆动”的电弧为工件进行预热并熔化工件侧壁, 而作用于熔池的激光则起到了增大熔深、稳定电弧和消除电弧热源导致的侧壁未熔合的作用, 如图 4 所示。



图 3 激光-MIG 复合焊电弧等离子体的三种截面形态示意图。

(a)(c) 电弧与一侧试板起弧并燃弧; (b) 电弧与两侧试板同时起弧并燃弧

Fig. 3 Three cross-section shape diagrams of laser-MIG hybrid welding arc plasma.

(a)(c) Arc striking/arcing with either side of test plate; (b) arc striking/arcing with both test plates at the same time

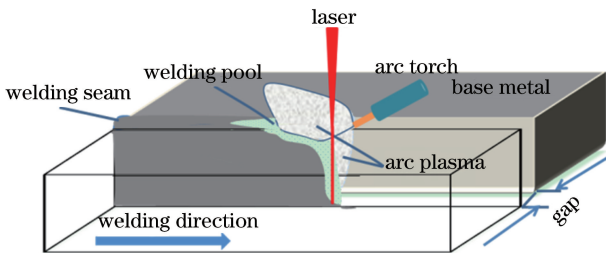


图 4 对接间隙下激光-MIG 复合焊成形机理示意图

Fig. 4 Diagram of forming mechanism of laser-MIG hybrid welding with butt gap

### 3.2.2 从焊缝组织均匀性角度分析

赵琳等<sup>[13]</sup>在研究激光电弧复合焊焊缝合金元素分布的研究中指出, 坡口间隙对复合焊焊缝的均匀性具有明显影响。本文从焊缝显微组织均匀性角度研究对接间隙下焊缝的显微硬度和显微组织, 分析焊缝的成形机理。对三组焊缝试样的有效连接区域沿熔深方向进行维氏硬度测量, 所用压力载荷为 1.96 N, 保压时间为 15 s, 显微硬度及显微组织取样位置如图 5 所示。



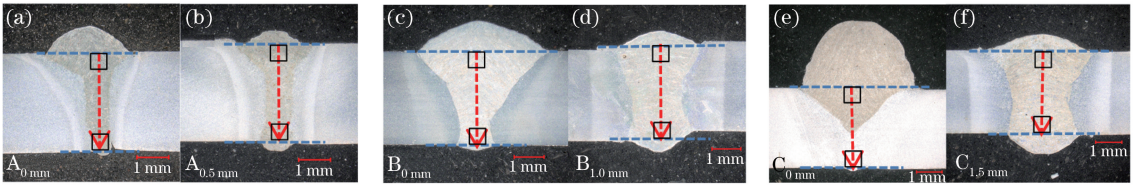


图5 焊缝上下部显微硬度及显微组织取样位置图

Fig. 5 Microhardness and microstructure sampling position diagrams of upper and lower welds

由图6可以看出,  $A_{0\text{ mm}}$  与  $A_{0.5\text{ mm}}$  焊缝中线的显微硬度以及焊缝上下部的显微组织均有明显差异:  $A_{0\text{ mm}}$  焊缝上部硬度较大, 下部硬度较小, 而  $A_{0.5\text{ mm}}$  焊缝上下部硬度较为均匀;  $A_{0\text{ mm}}$  焊缝上部组织为针状铁素体+粒状贝氏体+少量板条马氏体, 如图6(b)所示, 焊缝下部多为针状铁素体和板条铁素体, 如图6(c)所示, 而  $A_{0.5\text{ mm}}$  焊缝上下部均为板条马氏体+贝氏体+针状铁素体及少量板条铁素体, 如图6(d)、(e)所示。

由图7可以看出:  $B_{1.0\text{ mm}}$  焊缝上下部硬度较为均匀, 而  $B_{0\text{ mm}}$  焊缝上部硬度小于下部;  $B_{0\text{ mm}}$  焊缝上部组织为针状铁素体, 如图7(b)所示, 下部组织为

粒状贝氏体+板条铁素体, 如图7(c)所示;  $B_{1.0\text{ mm}}$  焊缝上部组织为粒状贝氏体+针状铁素体+少量板条铁素体, 如图7(d)所示, 下部组织为粒状贝氏体+针状铁素体, 如图7(e)所示。

由图8可以看出:  $C_{1.5\text{ mm}}$  焊缝上下部硬度比较均匀, 而  $C_{0\text{ mm}}$  焊缝上部硬度高于  $C_{1.5\text{ mm}}$  焊缝上部硬度, 而其下部硬度则低于  $C_{1.5\text{ mm}}$  焊缝下部硬度;  $C_{0\text{ mm}}$  焊缝上部组织为针状铁素体+板条贝氏体, 如图8(b)所示, 而焊缝下部组织为多边形铁素体, 如图8(c)所示;  $C_{1.5\text{ mm}}$  焊缝上下部组织均为粒状贝氏体+针状铁素体+板条铁素体, 如图8(d)、(e)所示。

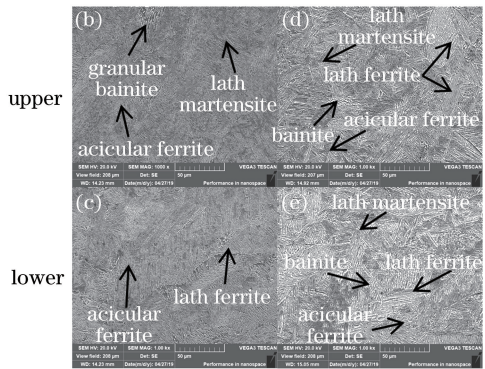
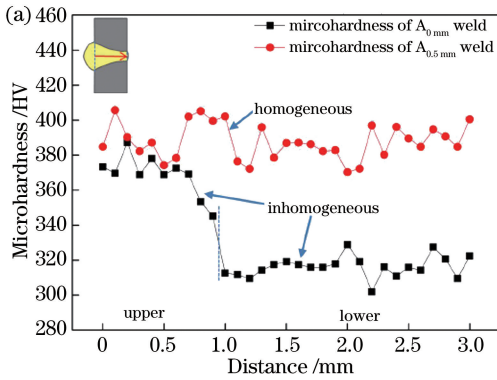


图6  $A_{0\text{ mm}}$  和  $A_{0.5\text{ mm}}$  焊缝中线的显微硬度以及焊缝上下部的显微组织。(a) 显微硬度图; (b)~(e) 显微组织

Fig. 6 Midline microhardness and microstructures of weld upper and lower parts of

$A_{0\text{ mm}}$  and  $A_{0.5\text{ mm}}$  welds. (a) Microhardness; (b)-(e) microstructures

零间隙焊缝上下部组织不均匀是由电弧加热不均匀以及焊缝上下部冷却速度不一致造成的。零间隙下, 电弧热量沿上表面向下传递, 焊缝上部较下部的高温停留时间长, 而有间隙下电弧则可以均匀地预热并熔化侧壁。零间隙下焊缝呈Y形, 焊缝上下表面的熔宽不同, 即焊接过程中熔池上下表面的宽度不同, 而有间隙下焊缝成形为U形, 焊缝上下表面熔宽基本一致, 即焊接过程中熔池上下表面的宽度基本一致, 导致零间隙下熔池上下部的冷却速度不一致, 而有间隙下熔池上下部冷却速度较为一致, 因此间隙下焊缝上下部的组织均匀性较零间隙焊缝好。

## 4 结 论

通过不同间隙下激光-MIG复合焊成形机理的研究, 明确了熔化工件侧壁的主要热源为MIG电弧等离子体, 而激光作用在熔池上的效果是加大熔深、稳定电弧和消除电弧热源导致的侧壁未熔合。由于高焊速、大送丝量情况下MIG电弧的稳定性较差, 未来的研究应尽量提高作用于工件侧壁的MIG电弧热量的比例, 降低MIG电弧能量在焊丝熔化端的能量消耗, 通过调整光丝间距控制激光作用在熔池和焊丝上的能量分布及MIG电弧电流的大小, 同时起到提高焊丝熔化率、稳定MIG电弧及控制焊缝熔深的作用。

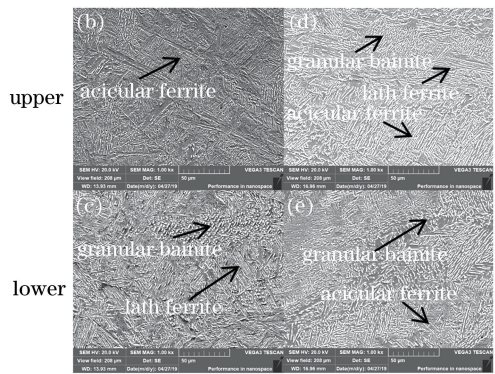
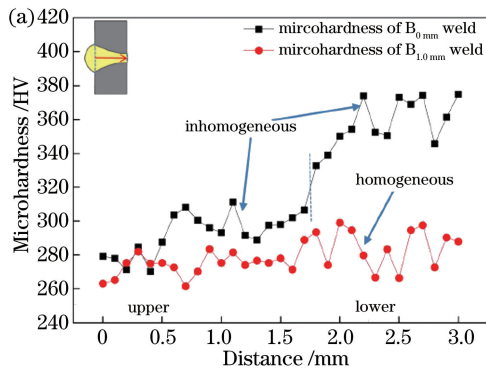


图 7  $B_{0.0\text{ mm}}$  和  $B_{1.0\text{ mm}}$  焊缝中线的显微硬度以及焊缝上下部的显微组织。(a)显微硬度;(b)~(e)显微组织  
Fig. 7 Midline microhardness and microstructures of weld upper and lower parts of  $B_{0.0\text{ mm}}$  and  $B_{1.0\text{ mm}}$  welds. (a) Microhardness; (b)-(e) microstructures

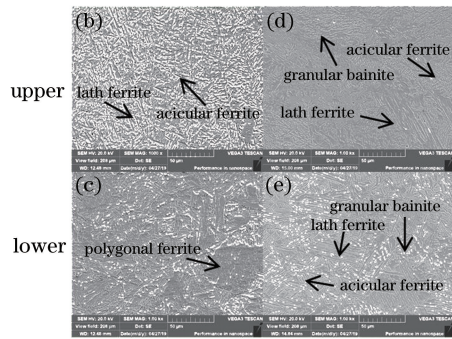
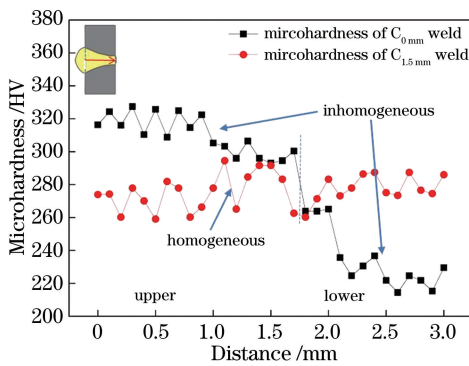


图 8  $C_{0.0\text{ mm}}$  和  $C_{1.5\text{ mm}}$  焊缝中线的显微硬度以及焊缝上下部的显微组织。(a)显微硬度;(b)~(e)显微组织  
Fig. 8 Midline microhardness diagram and weld upper and lower parts diagram of  $C_{0.0\text{ mm}}$  and  $C_{1.5\text{ mm}}$  welds. (a) Microhardness; (b)-(e) microstructures

参 考 文 献

[1] Farrokhi F, Kristiansen M. A practical approach for increasing penetration in hybrid laser-arc welding of steel[J]. Physics Procedia, 2016, 83: 577-586.  
[2] Bunaziv I, Akselsen O M, Frostevarg J, et al. Laser-arc hybrid welding of thick HSLA steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259: 75-87.  
[3] Zhang X, Mi G Y, Chen L, et al. Microstructure and performance of hybrid laser-arc welded 40 mm thick 316L steel plates [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259: 312-319.  
[4] Bunaziv I, Frostevarg J, Akselsen O M, et al. The penetration efficiency of thick plate laser-arc hybrid welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97: 2907-2919.  
[5] Chen G Y, Chen F, Zhang Y, et al. Effect of butt joint gap to high-strength automobile steel of fiber laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 0603013.  
陈根余, 陈飞, 张屹, 等. 对接间隙对车用高强钢光

纤激光焊接的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603013.  
[6] Gao M, Zeng X Y, Yan J, et al. Groove gap bridging ability of laser-arc hybrid welding[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(20): 2496-2500.  
高明, 曾晓雁, 严军, 等. 激光-电弧复合焊接的坡口间隙桥接能力[J]. 中国机械工程, 2008, 19(20): 2496-2500.  
[7] Lamas J, Frostevarg J, Kaplan A F H. Gap bridging for two modes of laser arc hybrid welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 224: 73-79.  
[8] Zhang Z, Shan J G, Wu A P, et al. Study on high speed laser-MIG hybrid welding for large gap joint of stainless steel sheet [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(10): 109-112.  
张洲, 单际国, 吴爱萍, 等. 不锈钢薄板大间隙接头激光-MIG电弧复合高速焊接工艺[J]. 焊接学报, 2015, 36(10): 109-112.  
[9] Wahba M, Mizutani M, Katayama S. Single pass hybrid laser-arc welding of 25 mm thick square groove butt joints [J]. Materials & Design, 2016,

- 97: 1-6.
- [10] Zhang Y L, Liu J, Shi Y, *et al.* Effect of current/voltage matching on stability of laser-arc hybrid welding process for aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(1): 79-83.  
张亚亮, 刘佳, 石岩, 等. 电流/电压匹配对铝合金激光-电弧复合焊接过程稳定性的影响[J]. 焊接学报, 2018, 39(1): 79-83.
- [11] Wang W, Lin S Y, Wang X Y, *et al.* Double electric conduction mechanism of Nd:YAG laser-pulse MAG hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 0203001.  
王威, 林尚扬, 王旭友, 等. 激光-熔化极脉冲电弧复合焊接的双重导电机制[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0203001.
- [12] Liu F D, Zhang H, Du S F, *et al.* Influence of laser power on arc and droplet behaviors in droplets on CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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.
- [13] Zhao L, Tsukamoto S, Arakane G, *et al.* Study on distribution of alloying elements in laser-arc hybrid welds [J]. Chinese Journal of 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.