

DOI: 10.3901/JME.2016.02.047

# 高强钢厚板激光-GMAW 复合双面同步横焊 特性研究

陈彦宾 冯杰才 李俐群

(哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对 30 mm 厚船用高强钢 10Ni5CrMoV 对接接头横焊应用需求, 开展激光-熔化极气体保护电弧(Gas metal arc welding, GMAW)复合双面同步横焊特性研究。研究表明, 针对横焊位姿因重力、非对称坡口对熔滴、电弧的影响, 利用激光对电弧的吸引和收缩作用, 通过减小光-丝间距, 有效地抑制了电弧侧壁燃弧, 熔滴在电磁力和等离子流力的作用下, 稳定过渡到熔池中, 实现了熔滴过渡稳定性控制, 解决了激光-GMAW 复合横焊位姿电弧偏离和熔滴下落等过程控制难题与侧壁未熔合问题; 厚板激光-GMAW 复合双面同步横焊包括打底层和填充层焊接, 其中打底层焊接是保证接头焊接质量的关键; 采用激光-GMAW 复合双面同步横焊新方法, 4 道焊接完成了 30 mm 厚船用高强钢 10Ni5CrMoV 横焊位姿的高强、高效连接。焊缝表面成形良好, 无裂纹、未焊透和侧壁未熔合等缺陷。接头的抗拉强度高于母材, 且其-50 °C 冲击吸收能量为 57.3 J。  
**关键词:** 激光-电弧复合焊; 横焊; 双面同步焊; 熔滴落点; 焊缝形貌

中图分类号: TG456

## Research on the Characteristics of Double-Sided Hybrid Laser-GMAW Synchronous Horizontal Welding of High-strength Thick Steel Plates

CHEN Yanbin FENG Jiecai LI Liqun

(State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** A double-sided hybrid laser-gas metal arc welding(GMAW) synchronous welding technology is systematic studied against the application of 30 mm thick, shipbuilding high-strength steel 10Ni5CrMoV butt joint in horizontal welding. The results show that against the effect of the gravity in horizontal position and the unsymmetrical groove on the behavior of droplet and arc, the problems such as deviation of arc, landing location of droplet and lack of sidewall fusion in the hybrid laser-GMAW horizontal welding process are solved by using the influence of laser on the arc shape. The deviation of the arc can be effectively suppressed by decreasing the distance between the laser and the wire because the arc could be effectively attracted and compressed when the distance is shorter. Therefore, the electromagnetic force and the plasma drag force promote the droplet transferred to the weld pool. The double-sided hybrid laser-GMAW synchronous horizontal welding includes root pass and filling pass welding, and the root pass welding is the key to guarantee the welding quality. The results also indicate that a 30 mm thick, shipbuilding high-strength steel 10Ni5CrMoV is welded by the novel, high-strength and high-efficient double-sided hybrid laser-GMAW synchronous welding with 4 passes. Excellent weld surface and welded joints without crack, incomplete penetration and lack of sidewall fusion defect are achieved. The ultimate tensile strength of the welded joint is higher than that of the base metal. Additionally, the impact toughness absorbed energy value of the welded joint is 57.3 J at -50 °C.

**Key words:** hybrid laser-arc welding; horizontal welding; double-sided synchronous welding; landing of droplet; welding morphology

### 0 前言

厚板高强钢因其具有高强度和高韧性而广泛

应用于船舶、油气管道和压力容器等领域<sup>[1-4]</sup>。厚壁构件最常用的焊接方法主要有电弧焊、电弧双面同步焊和激光-熔化极气体保护电弧(Gas metal arc welding, GMAW)复合焊。电弧焊主要有焊条电弧焊<sup>[5-6]</sup>、埋弧焊<sup>[7-9]</sup>和熔化极气体保护焊<sup>[10]</sup>。与电弧焊相比, 电弧双面同步焊接效率较高<sup>[11-12]</sup>, 已广泛

应用于管道和压力容器等领域<sup>[13-14]</sup>。激光-电弧复合焊接技术是由英国学者 STEEN 于 20 世纪 70 年代提出的<sup>[15-16]</sup>。激光-GMAW 复合焊接是将高能量密度的激光热源和宽加热范围的电弧热源组合起来的焊接方法<sup>[17-18]</sup>，在厚板焊接技术中显示出特有的优越性<sup>[19-21]</sup>。

在基础研究方面，早期的厚板激光-GMAW 复合焊接的研究主要以舰船、压力容器和管道等领域为研究背景，针对的材料主要有船用钢、管线钢和高强钢等，材料的厚度一般小于 20 mm，研究的内容主要是激光-GMAW 复合焊接的坡口设计<sup>[22-24]</sup>、间隙适应性<sup>[25-26]</sup>、错边适应性<sup>[27-28]</sup>、工艺参数对焊缝形貌的影响<sup>[29-32]</sup>、焊缝缺陷<sup>[33-35]</sup>、焊缝组织与性能<sup>[36-38]</sup>。研究表明，激光-GMAW 复合焊接综合了激光焊和电弧焊的优势，具有熔深大、焊接速度高、间隙与错边适应性宽和焊接变形小等特点，且其接头力学性能满足焊接质量要求<sup>[39]</sup>。对于舰船、大型储罐、管道和压力容器等大型结构件来说，横焊是一种重要连接形式。HAYASHI 等<sup>[40]</sup>针对 22 mm 厚的 SM490A 高强钢进行了激光-GMAW 复合横焊研究，认为与平焊位置相比，横焊不仅间隙适应性更好，而且焊缝熔深更大。WEVSTER 等<sup>[41]</sup>通过降低激光功率和焊接速度，复合横焊的焊接间隙可以增大至 3 mm(15 mm 厚的船用钢)，而对于 20 mm 厚 AH36 船用钢，在横焊位置，可以获得良好的焊缝，但是焊接速度较小，仅为 0.5 m/min。HOWSE 等<sup>[42]</sup>在完成 12.7 mm 厚 X52 管线钢激光-GMAW 复合横焊时，激光功率为 8.2 kW，焊接速度也仅为 0.5 m/min。因此，可以认为对于厚板激光-GMAW 复合横焊，需要适当地降低速度，才能获得良好的焊缝形貌。值得一提的是，KAH<sup>[39]</sup>认为 20 mm 厚板是激光-GMAW 复合单道焊接的极限，虽然大功率激光的熔深能大于 20 mm，但是焊缝底部容易出现裂纹和气孔等缺陷。近年来，HYATT 等<sup>[43]</sup>和 RETHMEIER 等<sup>[44]</sup>采用激光-GMAW 复合多道焊接方法分别实现了 25 mm 厚 HY 80 高强钢和 32 mm 厚 X65 管线钢的可靠连接。

在应用方面，德国、芬兰、意大利和美国等国家已将激光-GMAW 复合焊接技术成功地应用到舰船、管道和铁路车辆等大型厚壁构件的实际生产中，实现了焊接生产向高效、高质、节能发展，焊接变形和综合制造成本大幅度降低<sup>[45-47]</sup>。但是，我国在大型厚壁构件的激光-GMAW 复合焊接方面仍处在研究阶段，生产中采用的焊接技术主要有传统的焊条电弧焊、埋弧焊和气体保护焊以及电弧双面同步焊。大型厚壁构件对高效激光-GMAW 复合焊接技

术的需求十分迫切，而且对于一些大型结构件来说，横焊是一种重要连接形式，受重力的影响，复合焊接熔滴过渡行为更加复杂，焊缝成形控制难度也更大，易产生侧壁未熔合缺陷。对于厚板侧壁未熔合问题，目前已有的报道都集中在电弧焊接工艺上，通过调整电弧工艺参数、双丝或摆动方式，以控制电弧形态和稳定熔滴过渡，抑制侧壁未熔合缺陷<sup>[48-50]</sup>。但是与电弧焊相比，激光-GMAW 复合焊接熔滴过渡更难控制<sup>[51-52]</sup>，电弧的形态和熔滴过渡的稳定性不仅受输入能量的影响，还受到激光与电弧之间的距离(光-丝间距)的影响<sup>[53]</sup>。因此，本文以此为研究目标，针对 30 mm 厚船用高强钢 10Ni5CrMoV 对接接头横焊应用需求，开展激光-GMAW 复合双面同步横焊特性研究，解决厚板侧壁未熔合问题，实现横焊位姿的高强、高效连接。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验母材是厚度为 30 mm 的船用高强钢 10Ni5CrMoV，采用 K 型坡口，如图 1 所示。配套焊丝为 JS80，焊丝直径为 1.2 mm。母材和焊丝的化学成分如表 1 所示。焊接时，采用 95%Ar 和 5%CO<sub>2</sub> 混合气作为焊接保护气，流量为 25 L/min。

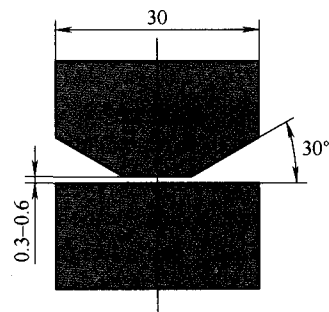


图 1 激光-GMAW 复合双面同步横焊坡口示意图

表 1 母材和焊丝化学成分(质量分数) %

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
母材	0.11	0.25	0.57	0.010	0.008	4.47	0.60	0.40
焊丝	0.05	0.40	1.72	0.009	0.009	2.50	0.60	0.60

### 1.2 试验方法

激光-GMAW 复合双面同步横焊系统由 2 套激光-GMAW 复合焊组成，如图 2 所示。2 套激光-GMAW 复合热源分居待焊试板的两侧，以相同的焊接工艺参数进行焊接。采用激光在前，电弧在后的复合方式进行焊接。主要设备包括：2 台 IPG 公司的激光器，分别为 5 kW 的光纤激光器(YLS-5000)和 10 kW 的光纤激光器(YLS-10000)，激光器主要

参数如表 2 所示; 2 台福尼斯公司的电弧焊机 (TPS4000); 2 台 KUKA 公司的 KUKA 机器人 (KR16-2)及其运动装置。



图 2 激光-GMAW 复合双面同步横焊系统

表 2 光纤激光器参数

波长/ $\mu\text{m}$	工作光纤直径/ $\mu\text{m}$	准直镜焦距/ $\text{mm}$	聚焦镜焦距/ $\text{mm}$	光束质量/ ( $\text{mm}\cdot\text{mrad}$ )
1.07	200	150	200	7.3

激光功率为 1.9~4.7 kW, 脉冲电弧频率为 220 Hz, 电弧电流为 160~260 A, 焊接速度为 0.6~1.4 m/min, 离焦量为 -2 mm, 光-丝间距为 2~4 mm。30 mm 厚高强钢优化的复合双面横焊工艺参数: 第 1 层为打底层, 激光功率为 4.7 kW, 电弧电流为 220 A, 速度为 0.6 m/min, 第 2~4 层为填充层, 激光功率为 1.9 kW, 电弧电流为 220~240 A, 速度为 0.8 m/min, 光-丝间距均为 2 mm。

图 3 为激光-GMAW 复合横焊熔滴过渡图像采集系统, 主要设备有: 1 台高速摄像机 (Camrecord 5000x2), 黑白图像采集, 16 GB 内存, 其最高采集频率为 5 000 帧/s, 在高速摄像机镜头配备波长为 810 nm 的窄带滤光镜; 1 台半导体脉冲激光光源 (CAVILUX HF), 波长为 810 nm, 脉冲周期为 0.1~10  $\mu\text{s}$ 。高速摄像机与焊缝在同一水平面上, 且高速摄像机与焊接方向的夹角为 45°。



图 3 激光-GMAW 复合双面同步横焊图像采集系统

采用 2% 的硝酸酒精腐蚀溶液对金相试样进行腐蚀并采用 OLYMPUS GX71 光学显微镜对试样进行观察。

按国际标准 ISO 6892-1:2009 进行拉伸性能测

试。采用 WE-1000B 电子万能试验机测试打底层和填充后整体接头的横向拉伸性能。对于打底层接头拉伸性能测试, 只测试打底层焊缝, 即将试样未填充部分铣平, 再进行打底层接头拉伸性能测试。按国际标准 ISO 9016:2001 进行夏比冲击性能测试。采用 Instron-9250 冲击试验机测试 -50 °C 焊缝冲击吸收能量。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 横焊位姿熔滴落点对焊缝形貌的影响

厚板激光-GMAW 复合双面同步横焊采用 K 型坡口, 如图 1 所示, 以抑制在横焊时由于重力的作用而引起的咬边问题。同时, 侧壁未熔合是厚板横焊时最容易出现的问题<sup>[48-50]</sup>, 坡口越窄小, 侧壁未熔合问题越突出。图 4 是电弧电流为 200 A 时, 厚板激光-GMAW 复合双面同步横焊出现的侧壁未熔合焊缝形貌。为了分析侧壁未熔合的形成原因, 采用高速摄像获取了激光-GMAW 复合双面同步横焊一侧的熔滴过渡行为图像, 如图 5 所示。

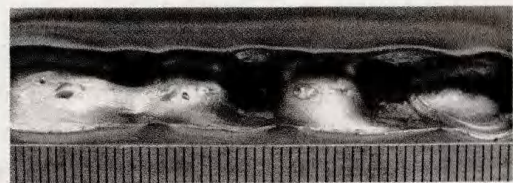


图 4 激光-GMAW 复合双面同步横焊焊缝侧壁未熔合图像

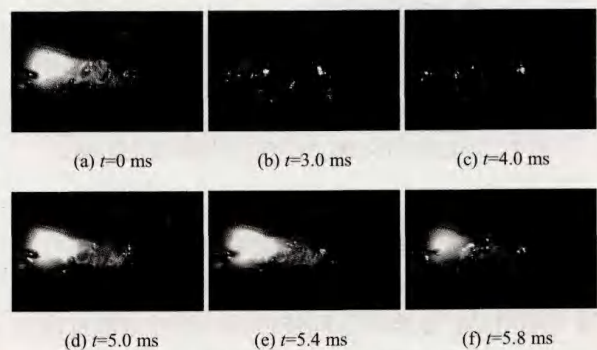


图 5 激光-GMAW 复合横焊熔滴过渡图像

从图 5 可以看出, 在脉冲电弧的基值和峰值电流时刻, 电弧都在坡口上侧壁燃弧, 熔滴脱离焊丝尖端后向熔池过渡, 但是由于此时电弧在侧壁燃烧, 熔滴未包裹在电弧中 (图 5d 和图 5e), 在熔滴飞行过程中, 电磁力和等离子流力对熔滴几乎没有作用, 在重力和激光匙孔金属蒸气反冲力的作用下, 熔滴落在坡口下侧壁上 (图 5f), 未能顺利过渡到熔池中。因此, 控制熔滴落点是抑制厚板激光-GMAW 复合横焊侧壁未熔合缺陷的关键。

为了控制熔滴落点, 解决厚板激光-GMAW 复合双面同步横焊侧壁未熔合缺陷, 建立了激光-GMAW 复合横焊熔滴不稳定过渡模式, 如图 6 所示, 从图 6 可以看出, 在焊接过程中, 电弧侧壁燃弧、电磁力  $F_{em}$  和等离子流力  $F_p$  沿着电弧燃弧方向, 从焊丝尖端指向坡口上侧壁(图 6a), 形成了类似于磁偏吹的现象, 熔滴脱离焊丝尖端后, 沿着焊接方向飞行, 由于此时熔滴未包裹在电弧中, 熔滴在飞行的过程中只受到重力  $F_g$  和激光匙孔金属蒸气反冲力  $F_v$  的作用(图 6b), 此时, 作用在熔滴上的重力方向向下, 而激光匙孔金属蒸气反冲力的方向与熔滴飞行方向相反, 这两个力的共同作用使得熔滴向坡口下侧壁飞行, 导致熔滴落在坡口下侧壁, 熔滴未能顺利过渡到熔池中, 形成侧壁未熔合缺陷。

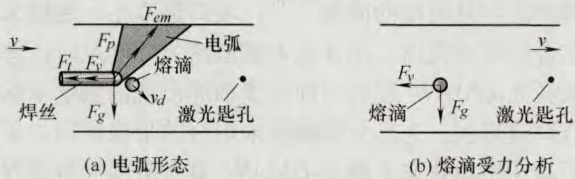


图 6 激光-GMAW 复合横焊熔滴不稳定过渡模式

基于上述分析, 首先, 拟采取增大电流的方法, 以增大电弧挺度, 让电弧在坡口中心燃弧, 使得熔滴在飞行时始终被包裹在电弧中(图 7a), 熔滴在飞行过程中始终受到电磁力和等离子流力的作用(图 7b), 以保证熔滴沿直线飞行并顺利过渡到熔池中。

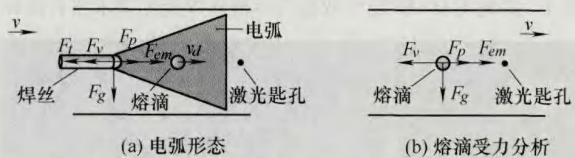


图 7 大电流激光-GMAW 复合横焊熔滴过渡模式

为了验证通过增大电流的方法实现熔滴落点控制的可行性, 利用高速摄像采集了熔滴的飞行过程图像。图 8 是电弧电流从 200 A 提高到 260 A 后, 激光-GMAW 复合双面同步横焊一侧的熔滴过渡行为图像, 从图 8 可以看出, 虽然增加了电弧电流, 但是在基值电流和峰值电流时刻, 电弧仍都在坡口上侧壁燃弧, 导致熔滴落在坡口下侧壁(图 8f)。因此, 通过提高电弧电流仍未能实现激光-GMAW 复合横焊熔滴落点的稳定性控制。

基于上述结果, 拟利用激光吸引电弧的特性, 通过减小光-丝间距, 增大激光匙孔金属等离子体对电弧的吸引作用, 让电弧在坡口中心燃弧, 使得熔滴在飞行时始终被包裹在电弧中(图 9a), 熔滴将在电磁力和等离子流力的作用下(图 9b), 沿直线飞行并顺利过渡到熔池中。

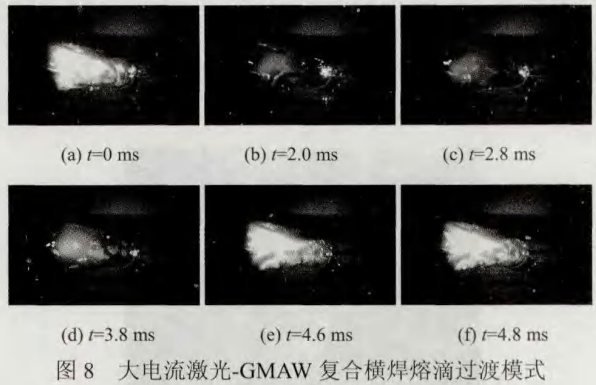


图 8 大电流激光-GMAW 复合横焊熔滴过渡模式

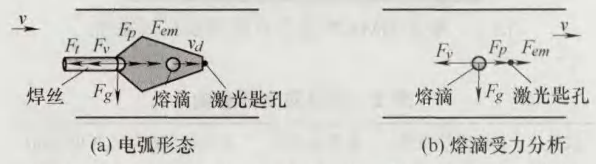


图 9 小光-丝间距激光-GMAW 复合横焊熔滴过渡模式

图 10 是光-丝间距从 4 mm 减小到 2 mm 后, 激光-GMAW 复合双面同步横焊一侧的熔滴过渡行为图像, 从图 10 可以看出, 光-丝间距减小后, 激光匙孔金属等离子体对电弧的吸引作用增强, 电弧在坡口中央燃弧, 坡口的上下两个侧壁都受到电弧的加热, 熔滴始终包裹在电弧中并沿着焊接方向飞行(图 10b~10d), 稳定过渡到熔池中(图 10f), 解决了横焊侧壁未熔合问题, 得到了成形良好的焊缝形貌, 如图 11 所示。

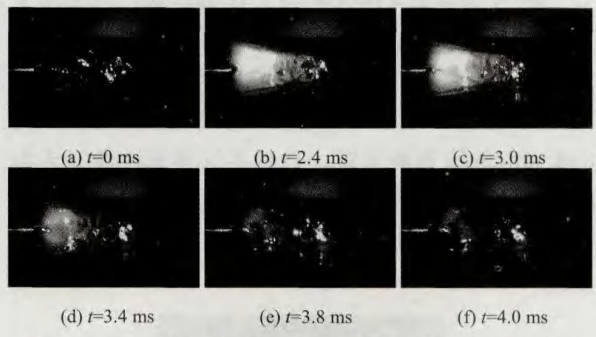


图 10 小光-丝间距激光-GMAW 复合横焊熔滴过渡图像



图 11 激光-GMAW 复合双面横焊无侧壁未熔合焊缝图像

综上所述, 电流大小并非影响熔滴落点的主要因素, 而光-丝间距才是控制熔滴落点的主要因素。因为增大高温高密度的激光匙孔金属等离子体对温度和密度相对较低的电弧等离子体的吸引作用, 可以有效抑制电弧侧壁燃弧, 保证电弧在坡口中心燃

弧, 是控制熔滴稳定过渡的有效方法。增大电弧电流, 并不能提高上述吸引作用, 而减小光-丝间距, 将缩短激光匙孔金属等离子体与电弧等离子体之间的距离, 有效地增大了激光匙孔金属等离子体对电弧等离子体的吸引作用, 保证电弧在坡口中心燃弧, 熔滴在电磁力和等离子流力的共同作用下, 稳定过渡到熔池中, 实现了厚板窄坡口激光-GMAW 复合横焊熔滴过渡落点稳定性控制, 解决了厚板窄坡口横焊侧壁未熔合问题。

## 2.2 输入能量和速度对焊缝形貌的影响

厚板激光-GMAW 复合双面同步横焊包括打底层和填充层焊接, 其中打底层焊接是保证接头焊接质量的关键。在实现了厚板激光-GMAW 复合双面横焊熔滴过渡稳定性控制并有效抑制侧壁未熔合缺陷的基础上, 进一步研究输入能量和焊接速度对打底层焊缝熔深、熔宽的影响。

图 12 是 30 mm 厚板激光-GMAW 复合双面同步横焊打底层焊缝横截面, 从图 12 可以看出, 焊缝呈“哑铃状”特征, 既不同于激光-GMAW 复合单面焊缝的“高杯状”特征<sup>[36]</sup>, 也不同于电弧双面焊缝的“束腰状”特征<sup>[11-12]</sup>。为了考察输入能量和速度对焊缝形貌的影响, 定义焊缝熔深  $H$  为焊缝左侧至右侧的长度, 定义焊缝中心熔宽为  $W_1$ , 焊缝表面熔宽为  $W_2$ , 如图 12 所示。

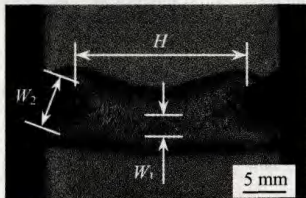


图 12 激光-GMAW 复合双面同步横焊打底层焊缝横截面

图 13 显示了激光功率对激光-GMAW 复合双面同步横焊打底层焊缝熔深的影响, 脉冲电弧电流为 220 A, 光-丝间距为 2 mm, 为保证完全穿透, 且获得较大的穿透熔深, 焊接速度略有降低, 为 0.6 m/min, 从图 13 可以看出, 激光-GMAW 复合双面同步横焊打底层熔深高达 15~18 mm。焊缝熔深随着激光功率的增大而增大, 激光功率从 2.7 kW 提高到 4.7 kW 时, 焊缝熔深提高了 14%。

图 14 显示了电弧电流对激光-GMAW 复合双面同步横焊打底层焊缝熔深的影响, 激光功率为 4.7 kW, 光-丝间距为 2 mm, 焊接速度为 0.6 m/min, 从图 14 可以看出, 焊缝熔深随着脉冲电弧电流的增大而增大, 电弧电流从 160 A 提高到 240 A 时, 焊缝熔深提高了 26%。这是因为电弧电流越大, 熔覆金属越多, 焊缝熔深越大。

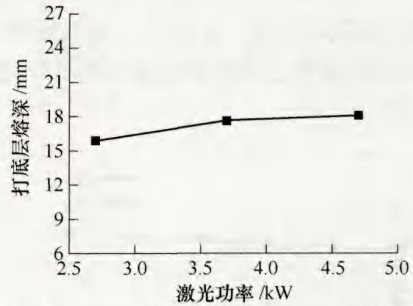


图 13 激光功率对打底层焊缝熔深的影响

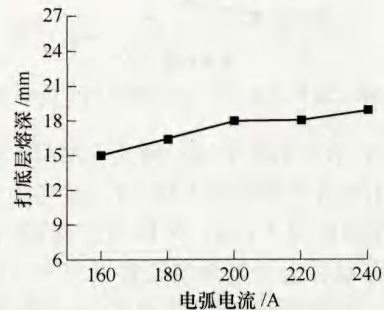


图 14 电弧电流对打底层焊缝熔深的影响

图 15 显示了焊接速度对激光-GMAW 复合双面同步打底层焊缝熔深的影响, 激光功率为 4.7 kW, 脉冲电弧电流为 220 A, 光-丝间距为 2 mm。从图 15 可以看出, 焊缝熔深随着焊接速度的增大而显著减小, 焊接速度从 0.6 m/min 提高到 1.4 m/min 时, 焊缝熔深降低了 33%。这是因为焊接速度越大, 单位时间熔覆金属越少, 焊缝熔深越小。对比图 13、图 14 和图 15 可以看出, 激光-GMAW 复合双面同步横焊打底层焊缝熔深主要影响因素是焊接速度。

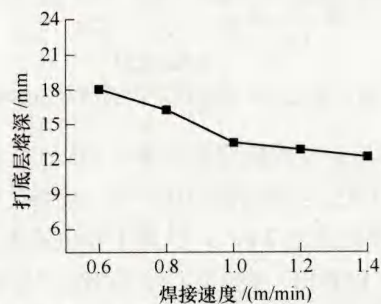


图 15 焊接速度对打底层焊缝熔深的影响

图 16 显示了激光功率对激光-GMAW 复合双面同步横焊打底层焊缝熔宽的影响, 脉冲电弧电流为 220 A, 光-丝间距为 2 mm, 焊接速度为 0.6 m/min, 从图 16 可以看出, 焊缝中心熔宽( $W_1$ )随着激光功率的增大而显著增大, 激光功率从 3.7 kW 提高到 4.7 kW 时, 焊缝熔宽提高了 3.5 倍; 而激光功率对焊缝表面熔宽( $W_2$ )影响较小, 激光功率从 2.7 kW 提高到 4.7 kW 时, 焊缝熔宽提高了 10%。由于激光的深穿透特性, 焊缝中心金属的熔化主要由激光的作用而

形成,而焊缝表面熔宽主要取决于电弧参数,所以,激光功率对焊缝中心熔宽影响显著而对焊缝表面熔宽影响较小。

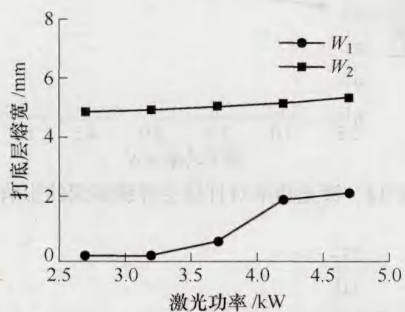


图 16 激光功率对打底层焊缝熔宽的影响

图 17 显示了电弧电流对激光-GMAW 复合双面同步横焊打底层焊缝熔宽的影响,激光功率为 4.7 kW,光-丝间距为 2 mm,焊接速度为 0.6 m/min,从图 17 可以看出,电弧电流对焊缝中心熔宽( $W_1$ )影响较小,而对焊缝表面熔宽( $W_2$ )影响显著。电弧电流从 160 A 提高到 240 A 时,焊缝表面熔宽提高了 80%。这是因为与激光的深穿透特性相比,电弧的热作用区浅而宽,所以电弧电流对焊缝中心熔宽影响较小,而对焊缝表面熔宽影响较大。

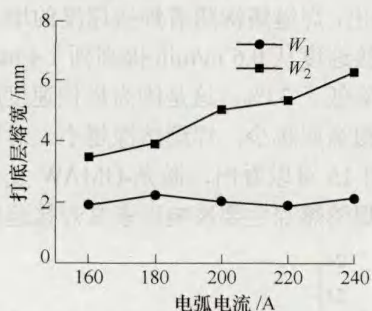


图 17 电弧电流对打底层焊缝熔宽的影响

图 18 显示了焊接速度对激光-GMAW 复合双面同步横焊打底层焊缝熔宽的影响,激光功率为 4.7 kW,光-丝间距为 2 mm,脉冲电弧电流为 220 A,从图 18 可以看出,焊缝中心熔宽( $W_1$ )和焊缝表面熔宽( $W_2$ )都随焊接速度的提高而减小。焊接速度从 0.6 m/min 提高到 1.4 m/min 时,焊缝中心熔宽降低了 30%,而焊缝表面熔宽降低了 59%。这是因为随着焊接速度的提高,激光和电弧热输入都减小,焊缝中心熔融金属和焊缝表面熔覆金属都减少了,所以焊缝中心熔宽和表面熔宽都随焊接速度的提高而减小。

图 19 和图 20 分别为优化焊接工艺参数得到的焊缝表面形貌和横截面。从图 19、20 可以看出,采用 4 道焊缝完成了 30 mm 厚高强钢的焊接,焊缝表

面成形良好,焊缝无未焊透、侧壁未熔合和裂纹等缺陷。

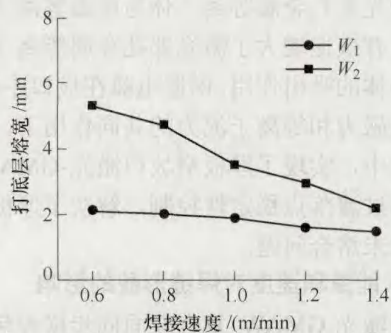


图 18 焊接速度对打底层焊缝熔宽的影响

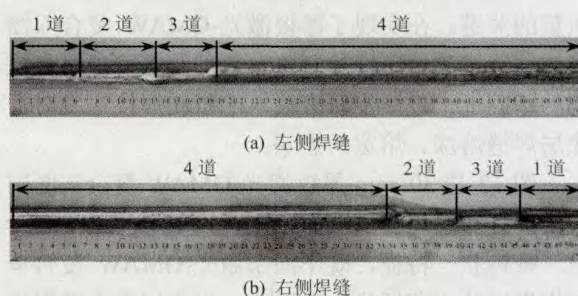


图 19 激光-GMAW 复合双面同步横焊焊缝表面形貌

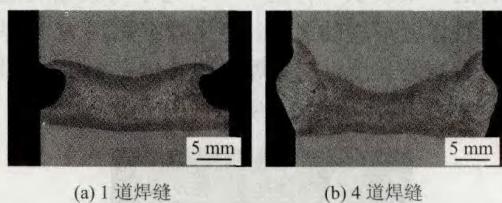
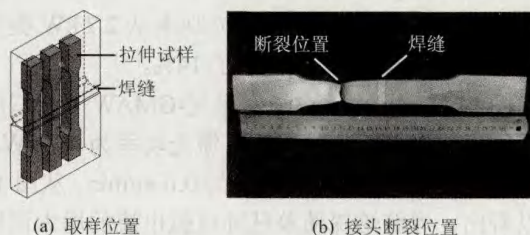


图 20 激光-GMAW 复合双面同步横焊焊缝横截面

### 2.3 接头拉伸与冲击性能

激光-GMAW 复合双面同步横焊打底层拉伸性能测试取样位置与接头断后试样如图 21 所示。从图 21b 可以看出,接头断裂位置与临近的焊缝熔合线的距离约为 40 mm,即接头断裂于母材,表明打底层接头抗拉强度高于母材。同时,填充层焊接完成后的整体接头的拉伸和冲击性能测试表明,整体接头的抗拉强度也大于母材,焊缝中部和焊缝上下部位的 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收能量分别达到 102 J 和 57.3 J,大于 27 J,满足焊接质量要求<sup>[54]</sup>。



(a) 取样位置 (b) 接头断裂位置

图 21 复合双面同步横焊打底层拉伸性能测试

### 2.4 工艺稳定性验证

为了验证激光-GMAW 复合双面同步横焊工艺

的稳定性, 采用优化工艺, 进行了长度为 1.5 m、厚度为 30 mm 的船用高强钢 10Ni5CrMoV 的焊接, 焊接过程稳定, 焊缝表面成形良好, 无裂纹和焊瘤等缺陷。图 22 为长厚板焊缝表面形貌。

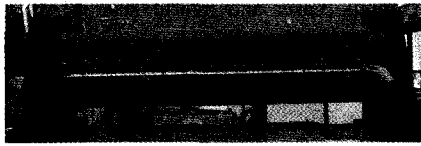


图 22 激光-GMAW 复合双面同步横焊长焊缝形貌

### 3 结论

(1) 针对横焊位姿因重力、非对称坡口对熔滴、电弧的影响, 利用激光对电弧的吸引和收缩作用, 通过减小光-丝间距, 有效地抑制了电弧侧壁燃弧, 熔滴在电磁力和等离子流力的作用下, 稳定过渡到熔池中, 实现了横焊位姿 30 mm 厚船用高强钢 10Ni5CrMoV 激光-GMAW 复合焊熔滴过渡稳定性控制, 解决了激光-GMAW 复合横焊位姿电弧偏离和熔滴下落等过程控制难题与侧壁未熔合问题。

(2) 厚板激光-GMAW 复合双面同步横焊包括打底层和填充层焊接, 其中打底层焊接是保证接头焊接质量的关键。打底层焊接工艺原则是采用大功率激光, 以实现深穿透, 而对于填充层焊接, 则采用小激光功率, 引导电弧实现稳定填充。打底层激光热输入是填充层激光热输入的 2.5 倍。

(3) 打底层焊缝熔深的主要影响因素是焊接速度; 焊缝中心熔宽的主要影响因素是激光功率; 焊缝表面熔宽则主要取决于电弧电流。

(4) 采用激光-GMAW 复合双面同步横焊新方法, 4 道焊接完成了 30 mm 厚船用高强钢 10Ni5CrMoV 横焊位姿的高强、高效连接。焊缝表面成形良好, 无裂纹、未焊透和侧壁未熔合等缺陷。接头抗拉强度高于母材, 且其 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击韧度吸收功为 57.3 J。

### 参 考 文 献

[1] HASHEMI S H. Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(3): 1648-1655.

[2] GOMEZ M, VALLES P, MEDINA S F. Evolution of microstructure and precipitation state during thermomechanical processing of a X80 microalloyed steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(13-14): 4761-4773.

[3] RUSINEK A, RODRIGUEZ-MARTINEZ J A, KLEPACZKO J R, et al. Analysis of thermo-visco-plastic behaviour of six high strength steels[J]. *Materials and Design*, 2009, 30(5): 1748-1761.

[4] SHOW B K, VEERABABU R, BALAMURALIKRISHNAN R, et al. Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and mechanical properties of a microalloyed HSLA steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(6): 1595-1604.

[5] ST-LAURENT S, LESPERANCE G. Effects of chemistry, density and size distribution of inclusions on the nucleation of acicular ferrite of C/Mn steel shielded-metal-arc-welding weldments[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1992, 149(2): 203-216.

[6] YAYLA P, ALUC E, URAL K. Effects of welding processes on the mechanical properties of HY 80 steel weldments[J]. *Materials and Design*, 2007, 28(6): 1898-1906.

[7] LAN Liangyun, QIU Chunlin, ZHAO Dewen, et al. Analysis of microstructural variation and mechanical behaviors in submerged arc welded joint of high strength low carbon bainitic steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 558: 592-601.

[8] KIRAN D V, BASU B, DE A. Influence of process variables on weld bead quality in two wire tandem submerged arc welding of HSLA steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(10): 2041-2050.

[9] SHEN S, OGUOCHA I N A, YANNACOPOULOS S. Effect of heat input on weld bead geometry of submerged arc welded ASTM A709 grade 50 steel joints[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(1): 286-294.

[10] SAMPATH V, KEHL II J, VIZZA C, et al. Metallurgical design of high-performance GMAW electrodes for joining HSLA-65 steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2008, 17(6): 808-819.

[11] ZHANG Y M, ZHANG S B. Double-sided arc welding increases weld joint penetration[J]. *Welding Journal*, 1998, 77(6): 57-62.

[12] ZHANG Huajun, ZHANG Guangjun, WU Lin. Effects of arc distance on angular distortion by asymmetrical double sided arc welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2007, 12(6): 564-571.

[13] 阮登林, 阮登荣. 铝镁合金焊接新工艺: 双弧焊接技术

- [J]. 管道技术与设备, 1998(6): 21-22.
- RUAN Denglin, RUAN Dengrong. New welding technology of aluminium magnesium alloy: Double-sided arc welding technology[J]. Pipeline Technique and Equipment, 1998(6): 21-22.
- [14] 冯曰海, 周方明, 蒋成禹. 双弧焊接工艺研究现状及发展[J]. 焊接, 2002(1): 5-9.
- FENG Yuehai, ZHOU Fangming, JIANG Chengyu. Research status and development of double-sided arc welding process[J]. Welding, 2002(1): 5-9.
- [15] EBOO M, STEEN W, CLARCK J. Arc augmented laser processing of materials[C]//Proceedings of the Conference on Advances in Welding Processes, Harrogate, 1978: 257-265.
- [16] STEEN W. Arc augmented laser processing of materials[J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51: 5636-5641.
- [17] BAGGER C, OLSEN F O. Review of laser hybrid welding[J]. Journal of Laser Applications, 2005, 17(1): 2-14.
- [18] RIBIC B, PALMER T, DEBROY T. Problems and issues in laser-arc hybrid welding[J]. International Materials Reviews, 2009, 54(4): 223-244.
- [19] ROEPKE C, LIU S. Hybrid laser arc welding of HY-80 steel[J]. Welding Journal, 2009, 88(8): 159-167.
- [20] 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]. Science and Technology of Welding and Joining, 2004, 9(4): 314-322.
- [21] CAO X, WANJARA P, HUANG J, et al. Hybrid fiber laser-arc welding of thick section high strength low alloy steel[J]. Materials and Design, 2011, 32(6): 3399-3413.
- [22] NILSSON K, HEIMBS S, ENGSTROM H, et al. Parameter influence in CO<sub>2</sub>-laser/MIG hybrid welding[J]. International Institute of Welding, 2003, 4(3): 1-11.
- [23] HOWSE D S, SCUDAMORE R J, BOOTH G S, et al. Development of the laser/MAG hybrid welding process for land pipeline construction[C]//Application and Evaluation of High-Grade Pipelines in Hostile Environments, Yokohama, 2002: 763-783.
- [24] SHIN M, NAKATA K. Single pass full penetration welding of high-tensile steel thick-plate using 4 kW fiber laser and MAG arc hybrid welding process[J]. Transactions of Joining and Welding Research Institute, 2009, 27(2): 80-84.
- [25] GRUNENWALD S, SEEFELD T, VOLLERTSEN F, et al. Solutions for joining pipe steels using laser-GMA-hybrid welding processes[J]. Physics Procedia, 2010, 5: 77-87.
- [26] SHI Gongqi. Laser and hybrid laser MAG welding of thick section C-Mn steel[C]//Proceedings of International Forum on Welding Technologies in Energy Engineering, Shanghai, 2005: 11-16.
- [27] VOLLERTSEN F, GRUNENWALD M S, RETHMEIER M, et al. Welding thick steel plates with fibre lasers and GMAW[J]. Welding in the World, 2010, 54(3-4): 62-70.
- [28] WESTIN E M, STELLING K, GUMENYUK A. Single-pass laser-GMA hybrid welding of 13.5 mm thick duplex stainless steel[J]. Welding in the World, 2011, 55(1-2): 39-49.
- [29] COUTOULY J F, DEPREZ P, DEMONCHAUX J, et al. The optimisation of laser welding and MIG/MAG-laser hybrid welding of thick steel sheets[J]. Lasers in Engineering, 2006, 16: 399-411.
- [30] YAMAMOTO N, LIAO J S, MURAKAMI T, et al. Fundamental study on fiber laser-MIG arc hybrid weldability of pure titanium[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 2013, 77(2): 39-43.
- [31] REUTZEL E W, SULLIVAN M J, MIKESIC D A. Joining pipe with the hybrid laser-GMAW process: Weld test results and cost analysis[J]. Welding Journal, 2006, 85(6): 66-71.
- [32] ROEPKE C, LIU S, KELLY S, et al. Hybrid laser arc welding process evaluation on DH36 and EH36 steel[J]. Welding Journal, 2010, 89(7): 140-149.
- [33] GEBHARDT M O, GUMENYUK A, RETHMEIER M. Solidification cracking in laser GMA hybrid welding of thick-walled parts[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(3): 209-213.
- [34] ACHAR D R G, PARHAR S, DILTHEY U. Use of synergistic effects in high power laser-GMA hybrid welding for manufacturing of thick walled structural pipes[C]//Materials Science Forum, Zurich, 2007: 3872-3876.
- [35] WIKLUND G, AKSELSEN O, SORGJERD A J, et al. Geometrical aspects of hot cracks in laser-arc hybrid welding[J]. Journal of Laser Applications, 2013, 26(1): 1-6.
- [36] GAO Ming, ZENG Xiaoyan, YAN Jun, et al. Microstructure characteristics of laser-MIG hybrid welded mild steel[J]. Applied Surface Science, 2008,

- 254(18): 5715-5721.
- [37] LIU Shuangyu, ZHANG Hong, HU Jiandong, et al. Microstructure of laser-MAG hybrid welds of sintered P/M steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(1): 251-257.
- [38] ZHEN Shu, DUAN Zhenzhen, SUN Daqian, et al. Study on microstructures and mechanical properties of laser-arc hybrid welded S355J2W+N steel[J]. Optics and Laser Technology, 2014, 59: 11-18.
- [39] KAH P. Overview of the exploration status of laser-arc hybrid welding processes[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2012, 30(2): 112-132.
- [40] HAYASHI T, KATAYAMA S, ABE N, et al. High-power CO<sub>2</sub> laser-MIG hybrid welding for increased gap tolerance. hybrid weldability of thick steel plates with a square groove[J]. Welding International, 2004, 18(9): 692-701.
- [41] WEBSTER S, KRISTENSEN J K, PETRING D. Joining of thick section steels using hybrid laser welding[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2008, 35(7): 496-504.
- [42] HOWSE D S, SCUDAMORE R J, BOOTH G S. The evolution of Yb fibre laser/MAG hybrid processing for welding of pipelines[C]//Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, 2005: 90-94.
- [43] HYATT C V, MAGEE K H, PORTER J F, et al. Laser-assisted gas metal arc welding of 25-mm-thick HY-80 plate[J]. Welding Journal, 2001, 80(7): 163-172.
- [44] RETHMEIER M, GOOK S, LAMMERS M, et al. Laser-hybrid welding of thick plates up to 32mm using a 20kW fibre laser[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2010, 27(2): 74-79.
- [45] DEFALCO J. Practical applications for hybrid laser welding[J]. Welding Journal, 2007, 86(10): 47-51.
- [46] ROLAND F, MANZON L, KUJALA P, et al. Advanced joining techniques in European shipbuilding[J]. Journal of Ship Production, 2004, 20(3): 200-210.
- [47] KRISTENSEN J K. State of art in shipbuilding applications of hybrid laser-arc welding[C]//The 12th Conference on Laser Materials Processing in the Nordic Countries, Copenhagen, 2009: 1-13.
- [48] 高超. 12Ni3CrMoV 钢旋转电弧窄间隙 MAG 横向焊接工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- GAO Chao. Research on the narrow gap rotating MAG arc horizontal welding process of 12Ni3CrMoV steel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [49] 徐望辉, 林三宝, 范成磊, 等. 船用高强度双丝窄间隙 GMAW 组织与性能研究[J]. 焊接, 2012(2): 50-55.
- XU Wanghui, LIN Sanbao, FAN Chenglei, et al. Research on the microstructure and mechanical properties of the narrow gap double-sided GMAW of shipbuilding steel[J]. Welding, 2012(2): 50-55.
- [50] 梅峻玺, 郭登成, 丁敏, 等. 大厚度 10Ni5CrMoV 钢小坡口旋转电弧 GMAW 焊接工艺研究[J]. 热加工工艺, 2010(9): 156-158.
- MEI Jinxi, GUO Dengcheng, DING Min, et al. Research on the small groove rotating GMAW process of thick-section 10Ni5CrMoV steel[J]. Hot Working Technology, 2010(9): 156-158.
- [51] 刘凤德, 张宏, 王宇琪, 等. 面能量对激光-电弧复合焊接焊缝及熔滴过渡的影响[J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 84-90.
- LIU Fengde, ZHANG Hong, WANG Yuqi, et al. Influence of area energy for welding seam and droplet transfer on hybrid laser-arc welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(14): 84-90.
- [52] 刘凤德, 张宏, 杜劲峰, 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.
- LIU Fengde, ZHANG Hong, DU Shaofeng, et al. Influence of laser power on arc and droplet behaviors in droplets on CO<sub>2</sub> laser-MAG arc hybrid welding. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(4): 75-82.
- [53] GAO Ming, MEI Shuwen, WANG Zemin, et al. Process and joint characterizations of laser-MIG hybrid welding of AZ31 magnesium alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(6): 1338-1346.
- [54] CHEN Yanbin, FENG Jiecai, LI Liqun, et al. Microstructure and mechanical properties of a thick-section high-strength steel welded joint by novel double-sided hybrid fibre laser-arc welding[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 582: 284-293.

作者简介: 陈彦宾, 1962 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为激光焊接。

E-mail: chenyb@hit.edu.cn

李俐群(通信作者), 女, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为激光焊接。

E-mail: liliquan@hit.edu.cn