

船用耐蚀钢 DH36 光纤激光-MIG 复合焊接接头组织和性能

高 艳¹, 崔 丽¹, 常耀卿¹, 顾长石², 贺定勇¹

(1. 北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124; 2. 上海船舶工艺研究所, 上海 200032)

摘 要: 为探索 12 mm 厚 DH36 船用耐蚀钢对接用光纤激光-MIG 复合焊接工艺, 分析了四种不同送丝速度对接头成形、微观组织、拉伸性能及腐蚀性能的影响。结果表明, 在送丝速度为 8.5 m/min 时可获得成形优良的接头, 随着送丝速度的增加, 电弧区和激光区焊缝的熔宽均增加。焊缝区主要由针状铁素体、先共析铁素体和一定量的贝氏体组成, 送丝速度对针状铁素体的形态和数量有显著的影响。增加送丝速度对接头抗拉强度的影响不大, 但减小了延伸率, 接头延伸率最高达 16.5%。接头极化曲线测试表明, 当送丝速度为 7.5 m/min 时, 自腐蚀电流密度最小, 腐蚀倾向最低。

关键词: 激光-MIG 复合焊; 耐蚀钢; 送丝速度; 组织; 性能

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20180320001

0 序 言

近年来, 高硫高酸的原油运输引发的货油舱 (COT, cargo oil tanks) 腐蚀失效事故频发, 导致巨大经济损失的同时引发生态系统的破坏^[1-3], 因而船体腐蚀问题已经成为制约船舶发展的关键问题^[4]。油舱 COT 内腐蚀环境十分复杂, 采用传统钢材建造油舱, 油舱内部需要进行涂层防腐处理^[5-7]。随着近年来国际海事组织 (IMO) 对船舶安全、环保和节能要求的不断提高, 耐蚀钢已成为 IMO 油舱 COT 涂层标准唯一的等效替代方案^[8]。目前国内外对于 COT 耐蚀钢的焊接研究主要集中在电弧焊、埋弧焊和气体保护焊工艺方面^[9, 10], 对焊接接头进行了成分、组织等因素对腐蚀性能的研究, 并取得了一定的成果^[11, 12], 但对基于 IMO 标准的耐蚀钢激光-电弧复合焊接头的相关研究鲜见报道。

对于中厚板来说, 传统弧焊坡口面积大, 焊接工程量大, 焊接效率低, 同时焊接热输入大, 导致焊接变形较大; 而纯激光焊接由于聚焦光斑较小, 对工件接头的装备精度要求较高, 且激光器及焊接系统价格昂贵, 成本较高。激光-MIG 电弧复合焊将激光与电弧两种热源有机结合, 既充分发挥各自的优

势, 又弥补了两者自身的不足, 达到 $1+1>2$ 的效果, 具有焊接效率高、热输入小及间隙适应性好等优点^[13, 14]。与单独的激光焊接/电弧焊接相比, 激光-MIG 电弧复合焊接生产效率高、间隙容忍度大且接头综合性能好^[15]。激光-MIG 电弧复合焊由于激光和电弧作用于同一熔池, 电弧的加入使得材料对激光的反射降低, 激光对电弧具有一定的引导和稳定作用, 因此, 二者协同作用相对于单一的弧焊或者激光焊, 具有更广阔的应用空间。

文中以 COT 船用 12 mm 厚的 DH36 钢对接接头为研究对象, 进行激光-MIG 复合焊接, 研究送丝速度对接头组织和性能的影响, 为船用耐蚀钢激光焊接的实际应用提供理论基础。

1 试验材料及方法

试验材料为 12 mm 厚 DH36 耐蚀钢板, 试板尺寸为 150 mm × 130 mm。焊接时填充直径 1.2 mm 的实芯焊丝 GH650NS, 耐蚀钢与焊丝的化学成分如表 1 所示。接头采用 Y 型坡口, 坡口角度为 60°, 钝边高度为 8 mm, 焊接过程中使用 Ar 作为保护气, 其纯度可达 99.9%。

焊接时采用 IPG 公司生产的 YSL-10000 激光器, 其额定输出功率为 10 000 W, 聚焦时光斑直径

表 1 DH36 钢及焊丝的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of experiment steel and filler wire

	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Sb	Cu	Ni	Cr
母材	0.098	0.28	1.08	0.011	0.002	0.025	0.014	0.082	0.024 1	0.247	—
焊丝	0.061	0.47	1.45	0.010	0.002	0.022	0.012	0.081	0.024 2	0.200	—

为 0.3 mm. 焊接过程中使用的机器人手为 KUKA, 电焊机为 Fronius 焊机. 焊前需对钢板表面的防锈漆和油污分别采用钢丝刷和丙酮进行打磨和清洗处理.

为了避免焊接过程产生开裂, 先对接头首尾处进行点焊, 然后再进行激光-MIG 复合焊接试验. 激光功率为 7.9 kW, 焊接速度为 78 cm/min, 离焦量为 0 mm, 光丝间距为 2 mm 恒定不变时, 将送丝速度由 7.0 m/min 增加至 8.5 m/min, 研究送丝速率对接头成形、微观组织及接头性能的影响.

焊后, 采用线切割将接头切成 20 mm × 10 mm 的试样, 进行研磨、抛光, 然后用 4% 的硝酸酒精溶液进行腐蚀, 制备金相试样. 利用 SZ61 体视显微镜观察焊缝的横截面形貌; 利用 OLYMPUS BX51M 卧式金相显微镜 (OM) 观察试样接头的微观组织; 采用 SU3500 扫描电镜 (SEM) 观察接头不同区域及断口形貌; 采用 MTS810 型拉伸机试验机进行拉

伸试验, 加载速率为 1.0 mm/min, 每个工艺参数测试三个试样, 结果取平均值; 在三电极体系的 PARSTAT-2273 电化学工作站进行接头焊缝金属的极化曲线测试, 腐蚀液为 10 wt.% 的 NaCl 溶液, PH = 0.85. 动电位极化曲线测量时, 扫描速度为 0.5 mV/s, 扫描区间为 ± 250 mV(相对于自腐蚀电位).

2 结果与讨论

2.1 接头横截面形貌

在其它焊接参数不变的条件下, 当送丝速度从 7.0 m/min 增加到 8.5 m/min 时, 接头横截面的成形如图 1 所示. 由图可知, 四种送丝速度下接头均获得了全熔透的“高脚杯”状焊缝, 焊缝中上部为电弧作用区域, 由于弧柱直径较大, 且能量分散, 在工

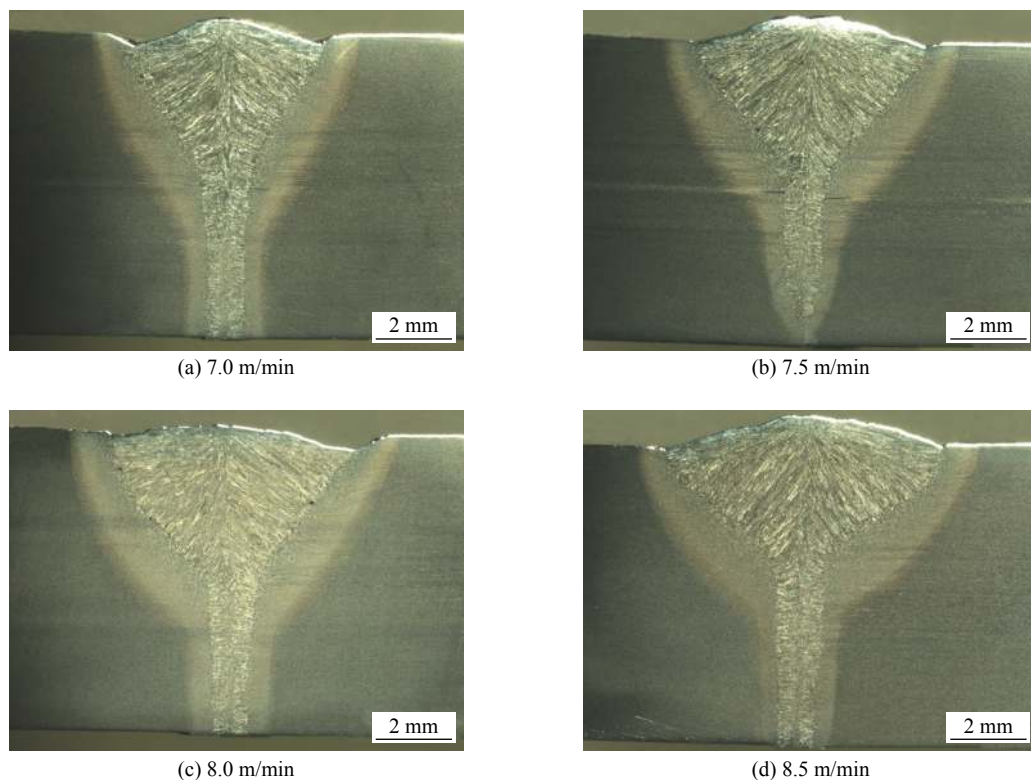


图 1 不同送丝速度下接头的横截面成形

Fig. 1 Cross-section of joints at different filler wire speeds

件表面作用时形成熔深浅、熔宽大的焊缝;下部焊缝为激光作用区域,由于激光束能量密度集中,光斑直径较小,作用在工件表面时产生匙孔效应,熔深增大、熔宽小^[16]。

焊缝熔深主要取决于激光功率,由于激光功率固定不变,因此激光焊缝熔宽和熔深变化较小。可见,接头呈现了激光与电弧两种热源协同作用形成的典型焊缝。焊缝表面形成了一定的余高,在一定程度上改善了单束激光焊缝易出现的凹陷缺陷。随着送丝速度的增加,焊缝熔宽不断增大,这是由于在激光-MIG 复合焊接过程中,采用一元模式,调节送丝速度即调控了焊接的电流及电压,增加送丝速度即增加了 MIG 电弧的功率。在激光热输入不变的条件下,增加了复合焊接的热输入

图2为不同送丝速度对焊缝形状尺寸的定量影响。由图2可知,当送丝速度由7.0 m/min增加至8.5 m/min时,电弧焊缝的熔宽 $W1$ 从8.44 mm增加到10.03 mm,激光焊缝区的熔宽略有增加, $W2$ 从1.63 mm增加至2.09 mm,但复合焊接头的熔深、余高深度几乎无变化。这是由于当送丝速度从7.0 m/min增加至8.5 m/min时,电弧电压及电流由 $U=19.5$ V, 电流 $I=169$ A 增加到 $U=25.7$ V, 电流 $I=228$ A, 即 MIG 电弧功率从 $P=3\,295.5$ W 增大到 $P=5\,859.6$ W, 说明电弧热源焊接热输入显著增加,导致了 MIG 电弧的弧柱直径增大,在接头上的作用面积增加,从而导致电弧焊缝宽度的明显增加。这与激光-MIG 电弧复合焊接文献报道一致,

焊缝的熔宽取决于电弧弧柱的宽度^[17]。此外,观察还发现,改变送丝速度对焊缝熔深的影响较小,这说明,电弧能量在接头成形对接头的熔深起辅助作用,且电弧功率不宜过大,复合焊接头的熔深主要还是受激光热输入大小的影响,由于激光热输入不变,因而增加送丝速度对焊缝的熔深几乎没有影响。

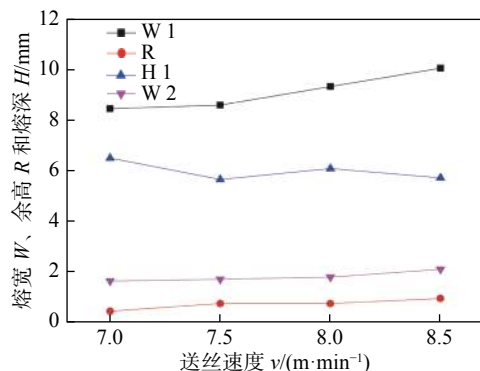
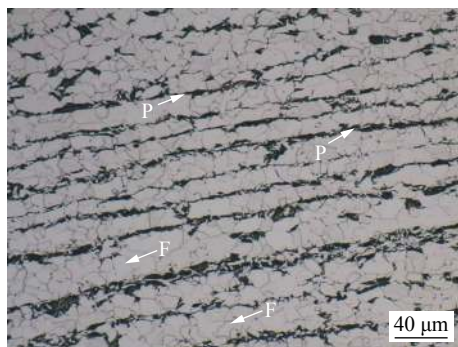


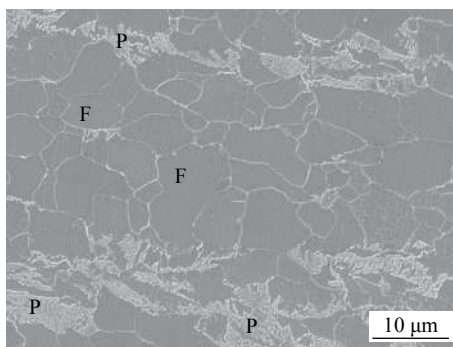
图2 不同送丝速度下接头的熔宽、余高和电弧区熔深变化
Fig. 2 Weld bead dimensions at different filler wire speeds

2.2 接头的微观组织

图3为耐蚀钢 DH36 母材的微观组织形貌。由图3a可知,母材组织呈现了明显的具有轧制特征的流线组织形貌。观察图3b 高倍 SEM 组织发现,母材 DH36 主要由铁素体和珠光体组织组成,珠光体呈片层状的沿着轧制的流线分布,在这珠光体之间分布着晶粒尺寸在 $0.9\ \mu\text{m} \sim 12.7\ \mu\text{m}$ 之间等轴晶铁素体。



(a) 显微组织



(b) 高倍 SEM 组织形貌

图3 DH36 钢的组织形貌

Fig. 3 Microstructures of DH36 steels

图4为激光-MIG 复合焊接 DH36 耐蚀钢焊缝区的组织形貌。与母材相比,激光-MIG 复合焊接后,焊缝组织发生了显著的变化。在四种送丝速度

下,焊缝组织出现了多种形态的铁素体和一定量的贝氏体,包括沿晶界析出的先共析铁素体 (GBF) 和出现于晶内的针状铁素体 (AF),还出现了贝氏体组

织, 珠光体则完全消失. 一般认为, GBF 会使焊缝

金属的韧性下降, 而 AF 则可显著改善焊缝韧性^[18].

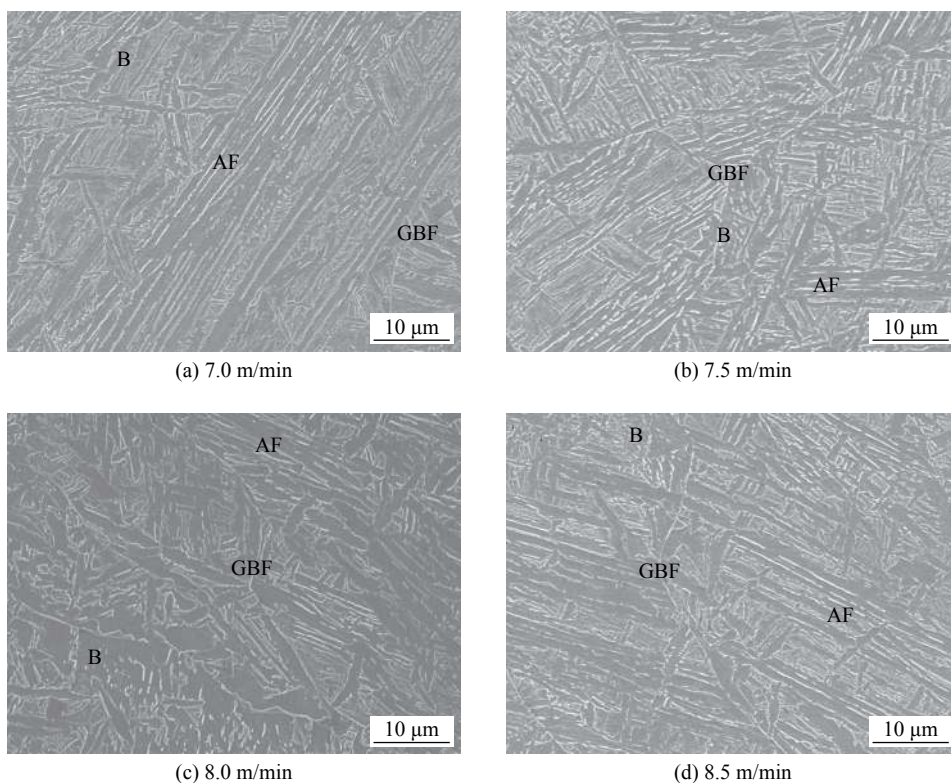


图 4 不同送丝速度焊缝的微观组织

Fig. 4 Microstructures of the welds at different filler wire speeds

上述 DH36 耐蚀钢焊缝组织的形成可用低合金钢焊缝金属连续冷却的转变相图来解释: 随着焊缝金属的冷却, 完全奥氏体化的金属在冷却转变的过程中, 转变产物的先后顺序一般为: 晶界先共析铁素体、侧板条铁素体、针状铁素体、贝氏体等. 由于焊缝金属的凝固是非平衡转变, 一般珠光体转变量非常小, 因此焊缝没有珠光体形成. 此外, 在熔池的冷却速度很快时, 焊缝中更易于形成针状铁素体. 由图 4a 可见, AF 的数量较多, 而在图 4b, 4c 和 4d 中数量较少. 随着送丝速度的增加, MIG 电弧热输入增加, 熔池的冷却速度降低, 因而送丝速度为 7.0 m/min 焊缝金属内形成的 AF 数量最多.

图 5 为 DH36 激光-MIG 复合焊热影响区组织. 在四种送丝速度下, 热影响区组织的物相主要由铁素体、珠光体和少量的粒状贝氏体组成. 与焊缝不同的是, 热影响区的组织中有珠光体、贝氏体的形成, 这是由于焊接加热过程中热影响区形成的过冷奥氏体, 在冷却过程中发生分解转变. 在焊接热循环作用下, 碳和铁原子扩散较容易, 出现扩散相变时形成了珠光体, 随着温度进一步降低, 形成了贝氏体^[18].

2.3 接头的力学性能

图 6 为不同送丝速度对接头拉伸性能的影响. 由图 6a 可见, 当送丝速度由 7.0 m/min 增加至 8.5 m/min 时, 接头的抗拉强度和屈服强度在 554 ~ 560 MPa, 466 ~ 474 MPa 范围内变化, 而接头延伸率从 16.5% 减小至 8.8%, 如图 6b 所示. 由此可见, 改变送丝速度对接头的抗拉强度和屈服强度影响不大, 这与雷振等^[19]的研究结果一致. 然而, 送丝速度的增加却降低了接头的延伸率, 这表明 MIG 电弧功率或热输入的增加, 降低了接头的塑性. 接头延伸率发生改变的根本原因在于不同送丝速度引起的接头焊缝金属组织中针状铁素体的含量差异导致的^[18]. 这与前面焊缝金属组织形态特征的结果是一致的. 由图 4 已知, 四种送丝速度下, 接头组织中的针状铁素体含量不同, 当送丝速度为 7.0 m/min 时, 针状铁素体的含量最多, 具有良好的塑韧性, 而 8.0 m/min 条件下针状铁素体的含量较少.

图 7 为不同送丝速度对 DH36 耐蚀钢激光-MIG 复合焊接头显微硬度的影响. 由图 7 可见, 当送丝速度由 7.0 m/min 增加至 8.5 m/min 时, 接头的显微硬度变化趋势类似, 焊缝区的显微硬度最

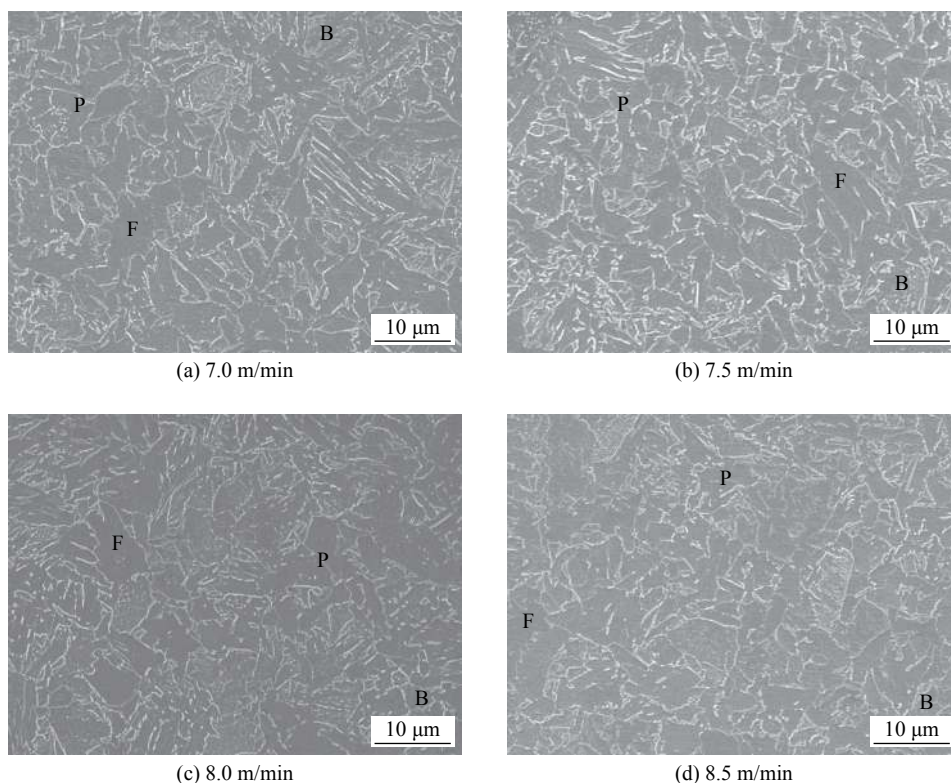


图 5 不同送丝速度下接头 HAZ 的组织形貌

Fig. 5 Microstructures of heat affected zone at different filler wire speeds

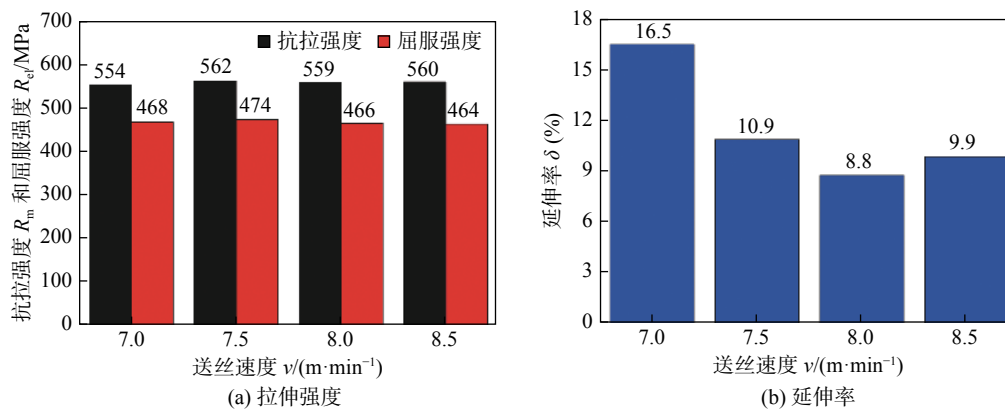


图 6 不同送丝速度下接头的拉伸性能

Fig. 6 Tensile properties of the welded joints at different filler wire speeds

大,可以达到 364 HV, 其次是热影响区, 最低的是母材。这是因为焊缝区组织为先共析铁素体、针状铁素体和贝氏体, 而热影响区主要是等轴状铁素体、珠光体和少量的粒状贝氏体组织。而显微硬度与微观组织间存在如下关系: 马氏体 > 贝氏体 > 珠光体 > 铁素体^[21]。

2.4 腐蚀性能

采用 PARST-2273 电化学工作站对不同送丝速度下获得的 DH36 耐蚀钢激光-MIG 复合焊接接头在货油舱下底板模拟腐蚀环境下进行了极化曲线

测试, 四种不同送丝速度焊缝金属的极化曲线结果如图 8 所示。对极化曲线的 Tafel 区进行拟合, 得出自腐蚀电位和腐蚀电流密度, 结果如表 2 所示。

由图 8 可知, 当送丝速度为 7.5 m/min 时, 自腐蚀电位为 -0.480 2 V, 此时自腐蚀电流密度最小, 为 42.658 0 $\mu A/cm^2$, 腐蚀倾向最低; 在送丝速度为 7.0 m/min 时, 腐蚀电位为 -0.499 5 V, 此时自腐蚀电流密度最大, 为 70.794 6 $\mu A/cm^2$, 腐蚀倾向最大。这与焊缝金属内部出现的针状铁素体 (AF) 组织本身有关。焊缝金属固态相变中, AF 组织是通过切变

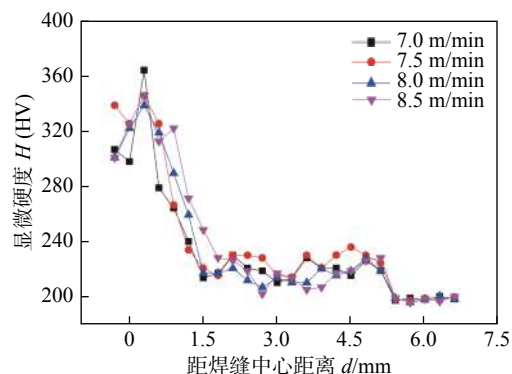


图 7 不同送丝速度下接头的显微硬度

Fig. 7 Micro-hardness of the welded joints at different filler wire speeds

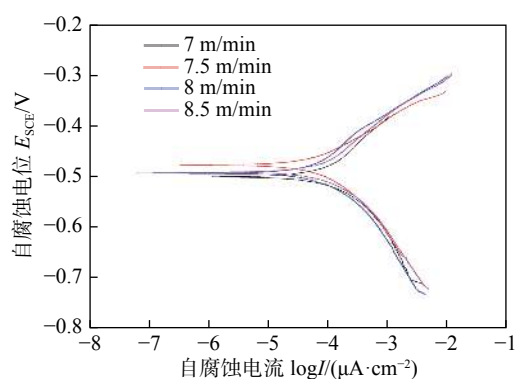


图 8 不同送丝速度下接头的极化曲线

Fig. 8 Polarization curves of the welded joints at different filler wire speeds

表 2 不同送丝速度下焊缝电化学参数拟合结果

Table 2 Fitting results of electrochemical parameters of welded joints at different filler wire speeds

送丝速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	自腐蚀电位 E_{SCE}/V	自腐蚀电流 $log I/(\mu A \cdot cm^{-2})$
7.0	-0.4995	70.7946
7.5	-0.4802	42.6580
8.0	-0.4914	51.2861
8.5	-0.4913	53.7032

机制形成的, 转变过程中有剧烈的塑性变形发生, 伴随产生大量的位错, 在位错处形成腐蚀孔并不断长大的几率远较无位错处的金属表面为大, 腐蚀孔的形成更易于发生在位错部位^[22]. 因此, 送丝速度为 7.0 m/min 时腐蚀倾向最大.

3 结 论

(1) 四种不同送丝速度下 DH36 耐蚀钢激光-MIG 复合焊接头均获得了全熔透的“高脚杯”状焊

缝, 且随着送丝速度的增加, 焊缝的宽度逐渐增加, 在电弧区焊缝熔宽由 8.44 mm 增加至 10.03 mm, 在激光区焊缝熔宽由 1.63 mm 增加至 2.09 mm.

(2) 不同送丝速度下焊缝金属组织形成了先共析铁素体 (GBF)、针状铁素体 (AF) 和少量的贝氏体 (B) 组织, 随着送丝速度的增加, 针状铁素体的形态和数量发生变化; 热影响区的物相均包含铁素体 (F)、珠光体 (P) 和少量的贝氏体 (B).

(3) 改变送丝速度对接头的抗拉强度和屈服强度影响不大, 对接头延伸率有重要的影响, 送丝速度的增加降低了接头的延伸率.

(4) 当送丝速度为 7.5 m/min 时, 自腐蚀电位为 -0.480 2 V, 此时自腐蚀电流密度最小, 为 42.658 0 $\mu A/cm^2$, 腐蚀倾向最低; 在送丝速度为 7.0 m/min 时, 腐蚀电位为 -0.499 5 V, 此时自腐蚀电流密度最大, 为 70.794 6 $\mu A/cm^2$, 腐蚀倾向最大.

参考文献:

- [1] Sun F, Li X, Zhang F. Corrosion mechanism of corrosion-resistant steel developed for bottom plate of cargo oil tanks[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2013, 26: 257–264.
- [2] 张国宏, 成林, 李钰, 等. 海洋耐蚀钢的国内外进展 [J]. 中国材料进展, 2014, 33(7): 426–435.
Zhang Guohong, Cheng Li, Li Yu, *et al.* Process of corrosion resistant steel at home and abroad[J]. Materials China, 2014, 33(7): 426–435.
- [3] Ito M, Kaneko M, Nishimura S, *et al.* Development of corrosion resistant steel for bottom plates of crude oil tanks and onboard evaluation results[C]//Proceedings of the ASME 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Brazil: ASME, 2012: 223–228.
- [4] 顾长石, 邱盛兴, 闫璐, 等. 基于 IMO 标准的船用耐蚀钢研究综述 [J]. 船舶工程, 2015, 37(10): 1–20.
Gu Changshi, Qiu Shengxing, Yan Lu, *et al.* Research summary of marine corrosion resistant steel based on IMO standard[J]. Ship Engineering, 2015, 37(10): 1–20.
- [5] 柳伟, 樊学华, 李少飞, 等. 油轮舱 CO₂-O₂-H₂S-SO₂ 湿气环境中低合金钢的腐蚀行为 [J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(1): 33–39.
Liu Wei, Fan Xuehua, Li Shaofei, *et al.* Corrosion behavior of low alloy steels in a CO₂-O₂-H₂S-SO₂ wet gas environment of crude oil tanks[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(1): 33–39.
- [6] 罗小兵, 柴锋, 苏航, 等. 含 H₂S 干湿交替环境下船用耐蚀钢研究 [J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(8): 51–53.

- Luo Xiaobing, Chai Feng, Su Hang, *et al.* Marine corrosion resistant steel research under dry-wet alternating environment with H₂S[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2013, 25(8): 51 – 53.
- [7] 梁金明, 唐 荻, 武会宾, 等. 基于 IMO 标准的 E36 级低合金钢板钢货油舱上甲板环境全周期腐蚀行为与机理 [J]. *材料研究学报*, 2014, 28(6): 433 – 442.
- Liang Jinming, Tang Di, Wu Huibin, *et al.* Cyclic Corrosion Behavior of E36 Low-alloy Steel in a Simulated Cargo Oil Tank Upper Deck Environment Corresponding to IMO Standard[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2014, 28(6): 433 – 442.
- [8] 陶乃旺, 黄淑珍, 黄宏钢. IMO 油船货油舱涂层及耐蚀钢试验方法及性能要求 [J]. *防腐涂料与涂装*, 2011, 26(10): 23 – 25.
- Tao Naiwang, Huang Shuzhen, Huang Honggang. Test methods and performance requirements for coating and corrosion resistant steel for cargo tank[J]. *Anticorrosive coatings and coating*, 2011, 26(10): 23 – 25.
- [9] 冯向阳, 齐彦昌, 彭 云, 等. 货油舱用耐蚀钢焊接接头的耐腐蚀性能 [J]. *钢铁研究学报*, 2012, 24(3): 44 – 49.
- Feng Xiangyang, Qi Yanchang, Peng Yun, *et al.* Corrosion resistance of corrosion resistant steel welded joints for cargo tanks[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2012, 24(3): 44 – 49.
- [10] 杨建伟, 许 静, 曹建平, 等. 原油船货油舱用耐蚀钢及焊接接头的腐蚀性能研究 [J]. *腐蚀与防护*, 2012, 33(2): 39 – 43.
- Yang Jianyi, Xu Jing, Cao Jianping, *et al.* Corrosion behavior of corrosion resistant steel and welded joints for cargo tank of crude oil Ship[J]. *Corrosion and Protection*, 2012, 33(2): 39 – 43.
- [11] Wei J S, Yan-Chang Q I, Tian Z L, *et al.* Corrosion Behavior of Welded Joints for Cargo Oil Tanks of Crude Oil Carrier[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2016, 23(9): 955 – 962.
- [12] 崔 丽, 高 艳, 顾长石, 等. 微量元素 Cr 对船用耐蚀钢焊接接头组织和性能的影响 [J]. *北京工业大学学报*, 2018, 44(6): 953 – 960.
- Cui Li, Gao Yan, Gu Changshi, *et al.* Effect of trace element Cr on microstructures and properties of welded joints of marine corrosion resisting steels[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2018, 44(6): 953 – 960.
- [13] 雷正龙, 陈彦宾, 李俐群, 等. CO₂ 激光-MIG 复合焊接射滴过渡的熔滴特性 [J]. *应用激光*, 2004, 24(6): 361 – 364.
- Lei Zhenglong, Chen Yanbin, Li Liqun, *et al.* Characteristics of droplet transfer in CO₂ laser-MIG hybrid welding with projected mode[J]. *Applied Laser*, 2004, 24(6): 361 – 364.
- [14] Chang Y F, Lei Z, Wang X Y, *et al.* Characteristic of laser-MIG hybrid welding with filling additional cold wire for aluminum alloy[J]. *China Welding*, 2018, 27(3): 35 – 41.
- [15] Li X Y. Study on the Progress of Welding Science and Technology in China[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(6): 19 – 31.
- [16] 刘巨峰. 厚板碳钢激光-MAG 复合焊接工艺研究及接头组织性能分析 [D]. 华中科技大学, 武汉, 2015.
- [17] Liu F D, Zhang Hong, Wang Y Q, *et al.* Influence of area energy for welding sea and droplet transfer on hybrid laser-arc welding[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(14): 84 – 90.
- [18] 杜则裕, 李亚江, 邹增大. 焊接科学基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [19] 常丽艳, 宋西平, 张 敏, 等. 基于原位 SEM 的激光-MIG 复合焊接 7075-T6 铝合金疲劳裂纹扩展行为 [J]. *焊接学报*, 2016, 37(5): 85 – 88.
- Chang Liyan, Song Xiping, Zhang Min, *et al.* In situ SEM based fatigue crack propagation behavior of hybrid laser welded 7075-T6[J]. *Transactions of the china welding institution*, 2016, 37(5): 85 – 88.
- [20] Zhang M, Wang X, Zhu G. Effect of laser welding process parameters on microstructure and mechanical properties on butt joint of new hot-rolled nano-scale precipitation-strengthened steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2014, 27: 521 – 529.
- [21] 黄安国, 李志远, 余圣甫, 等. 低合金钢焊缝金属的腐蚀行为 [J]. *焊接学报*, 2005, 26(11): 30 – 34.
- Huang Anguo, Li Zhiyuan, Yu Shengfu, *et al.* Corrosion behavior of weld metal of low alloy steel[J]. *Transactions of the china welding institution*, 2005, 26(11): 30 – 34.

第一作者简介: 高 艳, 女, 1991 年出生, 硕士研究生. 主要从事中厚板耐蚀钢焊接接头组织及性能研究, 已发表论文 3 篇. Email: 18701518026@163.com

通信作者简介: 崔 丽, 女, 1972 年出生, 博士, 教授, 博士生导师. 主要从事轻合金激光焊接方面的科研和教学工作. 发表论文 70 余篇. Email: cuili@bjut.edu.cn