

特约论文

10CrNi3MoV 钢激光 – MAG 复合热源焊接技术研究

王明林, 吴艳明, 张成杰, 王任甫

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘 要: 研究了船用 10CrNi3MoV 钢激光 – MAG 复合焊接头组织和力学性能, 并与常规 MAG 焊接头进行了对比。结果表明, 采用激光 – MAG 复合焊接工艺进行 10CrNi3MoV 钢焊接是可行的; 与常规 MAG 焊相比, 激光 – MAG 复合焊接头显微硬度明显升高, 焊缝中心冲击韧性有一定下降, 但仍能满足技术指标要求。为进一步改善焊接接头的综合性能, 提出通过焊接材料成分优化, 来降低焊缝金属淬硬倾向, 提高接头的韧性水平。

关键词: 激光 – 脉冲 MAG 复合焊接; 焊缝组织; 力学性能

中图分类号: TG456 **文献标识码:** A

Hybrid Laser – MAG Welding of 10CrNi3MoV Steel

WANG Ming-lin, WU Yan-ming, ZHANG Cheng-jie, WANG Ren-fu

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: The macrostructure, microstructure, mechanical property of hybrid laser arc weld in 10CrNi3MoV steel was evaluated. Experiments were conducted to compare hybrid laser arc welding (HLAW) to gas metal arc welding (GMAW). The result shows that, hybrid laser arc welding is a suitable process for 10CrNi3MoV steel. Compare to MAG welding process, HLAW welds exhibited much higher hardness and lower impact ductility, and the mechanical property of the HLAW welds meets the qualification. For further improvement of comprehensive mechanical property, approaches such as optimizing welding material component, reducing quench – hardening tendency of the welded joint to improve the joint impact ductility are presented.

Keywords: hybrid laser arc welding; microstructure; mechanical property

激光 – 电弧复合焊接是 20 世纪 70 年代末出现的一种新兴焊接技术, 它将两种物理性质、能量传输机制截然不同的激光和电弧热源复合在一起, 同时作用于同一加工位置, 既充分发挥了两种热源各自的优势, 又相互弥补了各自的不足, 从而形成了一种全新高效的热源, 具有焊接效率高、间隙适应性好、焊接变形小等优点^[1]。经过近 30 年的研究和发展, 目前一般强度级别材料激光 – 电弧复合焊接技术已逐步趋于成熟和完善, 被焊材料涉及不锈钢、低合金钢、铝合金、镁合金等高性能材料, 且在工程机械、航空航天、汽车工业、兵器、船舶制造等领域已获得广泛应用^[2-4], 尤其是欧美、日本等工业发达国家已

将激光 – 电弧复合焊接技术作为衡量其机械制造工艺水平的重要标志。而高强钢的激光 – 电弧复合焊接作为近年来的研究热点, 国内外众多学者也相继针对高碳、中碳、低合金及新一代超细晶等高强钢激光 – 电弧复合焊接技术开展了大量的试验研究, 并取得了一些研究成果, 为该技术推广应用于高强钢焊接奠定了一定基础, 但相对而言, 国内在高强钢激光 – 电弧复合焊接技术研究方面所做工作有限, 特别是针对船用高强钢的激光 – 电弧复合焊接技术研究更是少之又少, 且均采用 CO₂ 激光与电弧进行复合, 相对于光纤激光 – 电弧复合焊接技术, 加工柔性差, 结构复杂, 不利于工程应用。目前, 未见船用高强

收稿日期: 2012 – 10 – 23

钢光纤激光 – MAG 复合焊接相关研究报道。因此,有必要对光纤激光 – 电弧复合热源用于船用高强度钢焊接的适应性进行研究。

1 试验方法

试验母材为屈服强度 590 MPa 级的 10 mm 厚 10CrNi3MoV 船体结构钢,试件尺寸 300 mm × 100 mm × 10 mm,对接试板坡口角度 30°,钝边尺寸 4 mm; 焊接材料为直径 1.0 mm 的配套气保焊丝,采用 90% Ar + 10% CO₂ 混合气体; 母材和焊丝的化学成分如表 1 所示,母材及焊材熔敷金属力学性能如表 2 所示。

表 1 母材和焊丝的化学成分

Table 1 Chemical compositions of work piece and filler wire (w) %

Materials	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
10CrNi3MoV	0.06	0.60	0.23	1.10	2.68	0.22	0.08
Welding wire	0.01	1.54	0.45	—	2.5	0.27	—

表 3 基本试验参数

Table 3 Experimental Conditions

Welding speed	Laser power	Defocus	Current	Voltage	Voltage	Filling speed	Laser angle	Arc angle	Gas flux
$V/(m \cdot min^{-1})$	P/W	Def/mm	I/A	U/V	correction	D_{LA}/mm	$\theta/^\circ$	$\varphi/^\circ$	F/L
1	3 700/1 500	0	220	23.5	+10	3	0	30	20

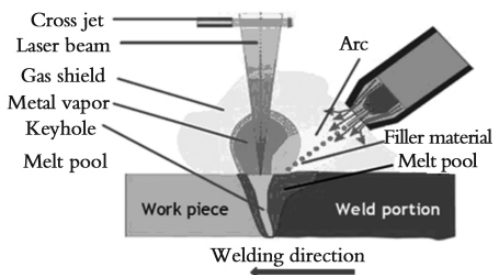


图 1 激光 – MAG 复合焊示意图^[3]

ig.1 Schematic diagram of Laser – MAG Hybrid Welding^[3]

2 试验结果与分析

2.1 焊接工艺分析

焊接效率高、热输入低、高焊缝深宽比是激光 – MAG 复合热源焊接的主要特点,但对于船

表 2 10CrNi3MoV 母材和 MAG 焊熔覆金属力学性能

Table 2 Mechanical Properties of 10CrNiMoV and MAG welding

Materials	Tensile strength R_m/MPa	Yield strength $R_{p0.2}/MPa$	Elongation rate $A/\%$
10CrNi3MoV	760	670	21
Deposited metal(MAG)	850	750	24

试验所用激光器为额定功率 10 kW 的 YLS 10000 型连续波光纤激光器,输出波长为 1.07 μm ,激光枪焦距 250 mm,光束焦点直径 0.5 mm,由芯径为 0.4 mm 的光纤传输。所用焊机为 TPS5000 数字化 MIG/MAG 焊机。

采用激光 – MAG 复合热源焊接方法(见图 1)进行对接试板的焊接,基本工艺参数见表 3。对接焊缝由打底焊道和盖面焊道(1 道)组成,打底焊道、盖面焊道所用的激光功率分别为 3,700 W、1,500 W, MAG 焊参数相同。焊后进行焊接接头拉伸、冲击、冷弯试验,并观察焊接接头的微观组织、测试其显微硬度,并与常规 MAG 焊接进行对比分析。

用低合金高强度钢焊接来说,焊缝冷却速度过快可能导致接头韧性下降。因此,本文采用双层双道焊接工艺,在充分发挥激光 – MAG 复合焊特点的同时尽量减小冷却速度过快带来的负面影响。

焊缝表面成形及横截面形貌如图 2 所示,打底焊道深宽比大,熔深约为 7 mm; 填充焊道采用激光功率较小,呈普通 MAG 焊焊缝形貌特征。

图 3 为 10 mm 10CrNi3MoV 钢激光 – MAG 焊和常规 MAG 焊的相关参数的对比。从图中可以看出,复合焊效率约为常规 MAG 焊的 6.5 倍; 复合焊线能量为 5.0 kJ/cm,远低于常规 MAG 焊的 11.4 kJ/cm; 以 10 m 焊缝为例,常规 MAG 焊填充量约 3.25 kg,复合焊的填充率仅为 0.4 kg; 复合焊的焊接变形也仅为常规 MAG 焊的 1/4。

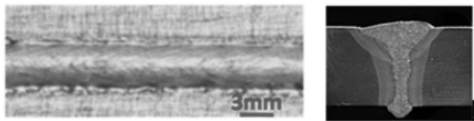


图 2 焊缝成形及横截面形貌

Fig. 2 Morphology of welded joint

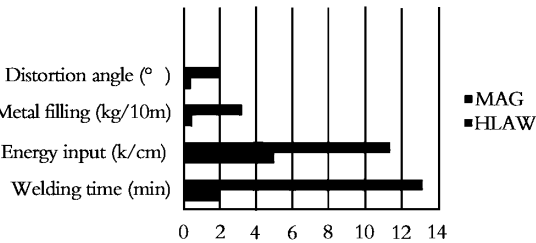


图 3 激光 - MAG 复合焊与常规 MAG 焊参数对比

Fig. 3 Parameters comparison between HLAW and MAG

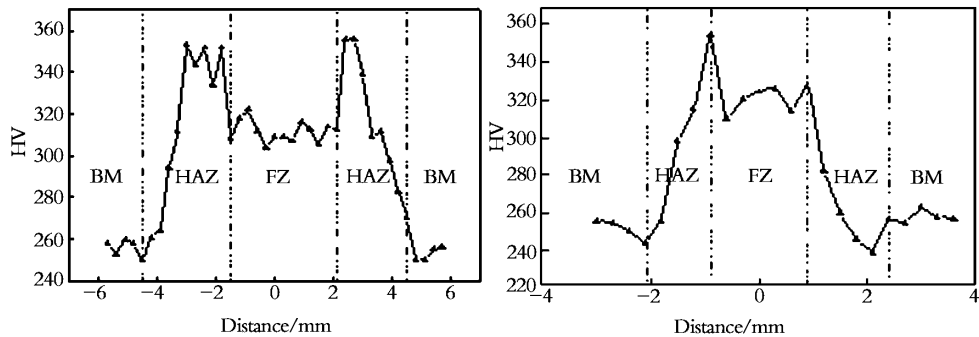


图 4 焊接接头显微硬度(HV) 分布

Fig. 4 Miro - hardness of welding alloy

10CrNi3MoV 钢激光 - MAG 复合焊和常规 MAG 焊接头显微硬度(HV) 分布如表 4 所示。结果表明,激光 - MAG 复合焊接头显微硬度明显高于常规 MAG 焊($V = 0.3 \text{ m/min}$) 接头对应区域; 对比不同焊接速度下 MAG 焊对应区域显微硬度可以看出, $V = 1.0 \text{ m/min}$ 时接头显微硬度远高于 $V = 0.3 \text{ m/min}$ 时的; $V = 1.0 \text{ m/min}$ 时, MAG 焊接头显微硬度又略高于激光 - MAG 复合焊接头对应区域。由此可见: 热输入低、冷却速度快是导致激光 - MAG 复合焊接头显微硬度高于常规 MAG 焊的根本原因。

表 4 不同工艺条件下接头显微硬度(HV)

Table 4 Miro - hardness of different process joint

Welding method	Weld center	Fusion zone	HAZ
	zone HV	HV	HV
HLAW($V = 1.0 \text{ m/min}$)	312	314	357
MAG($V = 0.3 \text{ m/min}$)	251	263	310
MAG($V = 1.0 \text{ m/min}$)	347	350	377

2. 2 焊接接头力学性能

2. 2. 1 显微硬度

激光 - 电弧复合焊焊接接头显微硬度分布如图 4 所示。可以看出,焊接接头上表面(试板上表面以下 2 mm 处) 的硬度: 热影响区显微硬度高达 357 HV, 明显高于焊缝区的平均显微硬度(312 HV) 以及母材的显微硬度(257 HV) ; 焊接接头下表面(试板下表面以上 3 mm 处) 硬度分布规律与上表面基本一致,只是焊缝硬度(325 HV) 略高于上表面的,总体来说,在焊接接头的上表面、下表面,其焊缝和热影响区均存在不同程度的硬化现象,但即使这样仍能满足 10CrNi3MoV 钢焊接接头显微硬度不高于 410 HV 技术要求。

2. 2. 2 力学性能

依据 GB/T2650—2008 《焊接接头冲击试验方法》、GB/T2651—2008 《焊接接头拉伸试验方法》、GB/T2652—2008 《焊接接头弯曲及压扁试验方法》对 10CrNi3MoV 钢激光 - 电弧复合焊接接头及常规 MAG 焊进行常规力学性能对比试验,试验结果如表 5 所示。

两种焊接接头的抗拉强度基本一致,且试样均断在母材,冷弯后试验面无目视可见裂纹,均满足材料指标要求; 激光 - 电弧复合焊熔合线处 - 50 ℃ 冲击吸收功平均值为 206 J,而焊缝中心区 - 50 ℃ 冲击吸收功仅为 55 J,与常规 MAG 焊接接头焊缝中心 70 J 相比,激光 - 电弧复合焊的焊缝中心冲击韧性有一定程度降低,表明焊缝中心是焊接接头的薄弱位置,但即便如此,仍能满足 - 50 ℃ 不小于 27 J 技术指标要求。

2. 2. 3 接头显微组织分析

图 5 为 10CrNi3MoV 钢激光 - 电弧复合焊

接头金相组织,结果表明,打底焊道和填充焊道的组织基本相同,均为针状铁素体 + 粒状贝氏体 + 少量的先共析铁素体,其中粒状贝氏体含量较高,多呈长条状,尺寸较大,且焊缝组织整体分

布具有一定的方向性;道间过渡层的组织主体为粒状贝氏体 + 铁素体,还有少量的针状铁素体;粗晶区为典型的侧板条马氏体组织。

表 5 接头力学性能

Table 5 Mechanical Properties of Weld

	Tensile strength R_m /MPa	Bending property ($180^\circ, d=3a$)	Charpy impact energy (-50°C) KV2/J	
			Fusion zone	Weld center
HLAW	757,756 (crack in base material)	accepted	208,216,195	49,64,52
MAG	758,760 (crack in base material)	accepted	81,78,77	66,68,75

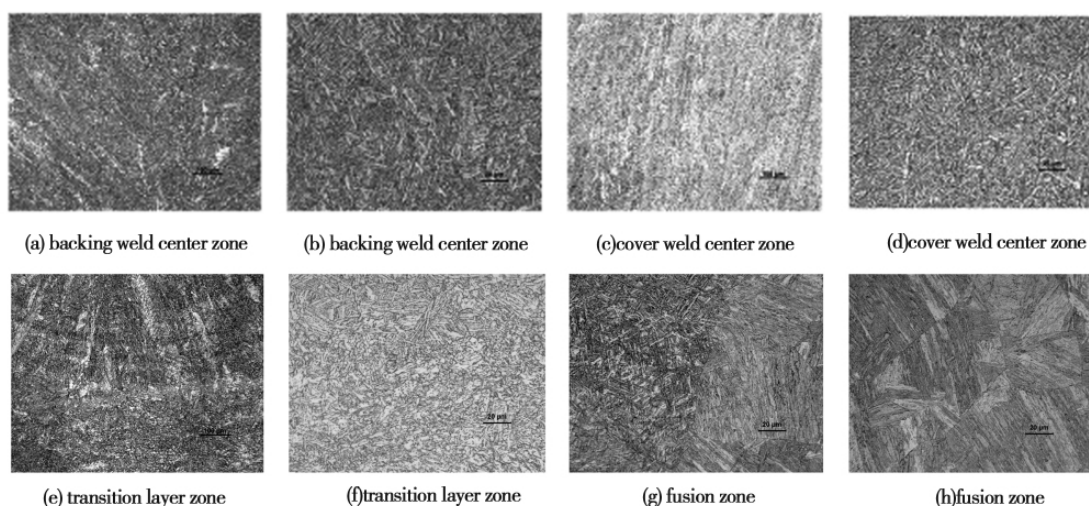


图 5 复合焊接接头金相组织

Fig. 5 Optical micrographs of HLAW welded

10CrNi3MoV 钢常规 MAG 焊接焊缝组织如图 6 所示。可以看出,焊缝组织为针状铁素体 + 先共析铁素体 + 粒状贝氏体,粗晶区为侧板条马氏体 + 贝氏体组织。对比可以看出,激光 - MAG 复合焊焊缝组织和常规 MAG 焊焊缝组织有较明显差别:复合

焊焊缝组织中粒状贝氏体含量比常规 MAG 焊缝高,且焊缝组织整体分布具有一定的方向性;复合焊粗晶区组织为单一的侧边条马氏体,未出现 MAG 焊接接头粗晶区中存在的贝氏体,这种组织的形成可能与激光 - 电弧复合焊热输入小、焊缝冷却速度快有关。

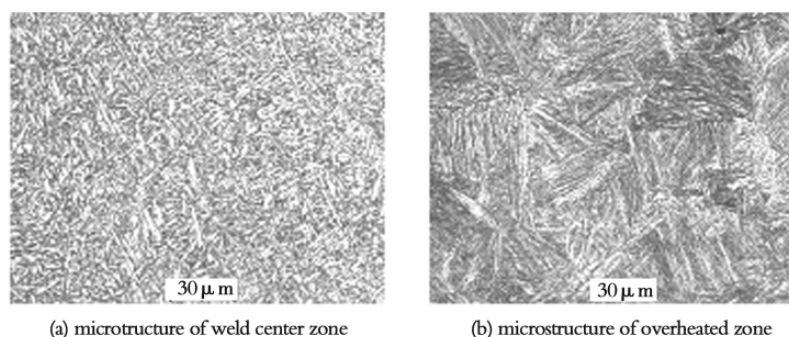


图 6 MAG 焊接接头金相组织形貌

Fig. 6 Optical micrographs of MAG welded

3 讨论

综合分析表明, 10CrNi3MoV 钢激光 - MAG 复合焊接头与常规 MAG 焊接头组织及力学性能相比有较大差异。激光 - MAG 复合焊焊缝显微组织与常规 MAG 焊焊缝相比具有更强的方向性, 且粒状贝氏体含量较高, 但组织较粗, 多呈长条状, 复合焊焊缝组织的这种方向性主要是因为焊接冷速快、温度梯度大, 导致焊缝在冷却后柱状晶结构较为明显。此外, 复合焊焊缝的熔合比较常规 MAG 焊的要大, 从而使得该类钢焊缝中 Mn 含量降低, 针状铁素体形核质点减少^[5], 也进一步加剧了焊缝组织的方向性; 激光 - MAG 复合焊接头热影响区及焊缝显微硬度显著提高, 这与高强钢母材合金元素含量高、焊接冷速大、焊缝淬硬性倾向大有关; 正因为与常规 MAG 焊相比激光 - MAG 复合焊接头的硬度较高、组织的方向性较明显, 导致其焊缝韧性较低, 但这种组织对接头强度及抗弯性能影响不大。总体来说, 即使复合焊接头的淬硬性倾向大、韧性较低, 但接头的拉伸、冲击、冷弯、硬度等所有试验结果仍能满足材料指标要求, 说明采用激光 - MAG 复合热源焊接方法进行 10CrNi3MoV 船用高强钢的焊接是可行的。

科罗拉多矿业学院的 C. ROEPKE 和 S. LIU 曾研究了屈服强度为 550 MPa 级的 HY80 钢激光 - MAG 复合焊接头组织和力学性能, 同样遇到激光 - MAG 复合焊接头硬度高, 冲击韧性较低的问题, 并提出采用焊前预热和提高焊接热输入的方法有效地降低了接头硬度, 提高了焊缝冲击韧性^[6]。但作者认为, 对实际工程应用来说, 焊前预热增加了施工难度及建造成本, 不利于激光 - MAG 复合焊技术的推广和应用, 且仅仅依靠焊接工艺的调整对接头综合性能的改善提高也是有限的。基于此, 针对 10CrNi3MoV 钢激光 - MAG 复合热源焊接, 为进一步改善焊接接头性能水平, 提出通过调整焊接材料成分、优化焊缝合金设计, 以降低焊缝金属淬硬倾向、提高接头韧性。

4 结论

(1) 与常规 MAG 焊相比, 10CrNi3MoV 钢激

光 - MAG 复合热源焊具有焊接效率高、热输入低、高焊缝深宽比的特点; 复合焊焊缝组织方向性较强, 焊接接头淬硬性倾向较大, 焊缝冲击韧性有一定程度降低。

(2) 10CrNi3MoV 钢激光 - MAG 复合焊焊接接头的拉伸、冲击、冷弯、硬度测试结果均能满足材料指标要求, 表明采用激光 - MAG 复合焊接工艺进行 10CrNi3MoV 钢焊接是可行的。

(3) 针对 10CrNi3MoV 钢激光 - MAG 复合热源焊接, 提出通过调整优化焊接材料成分, 降低焊缝金属淬硬倾向, 进一步提高焊接接头的综合性能。

参考文献:

- [1] Steen W M. Arc augmented laser processing of materials [J]. Journal of Application Physics, 1980, 51 (11): 5636—5641.
- [2] Nobuguki A, Yasushi K. Dynamic observation of speed laser - Arc combination welding of thick steel [J]. Section G - ICALEO(1), 1997: 155—163.
- [3] Dilthey U. Prospect by combing and coupling laser beam and arc welding processes [J]. Welding in the World, 2000, 3: 37—46.
- [4] Haferkamp H, Ostendorf A. Nd: YAG laser MIG hybrid welding of zinc - coated fine sheet and magnesium materials [J]. Laser - Opto, 2001, 33 (1): 61—63.
- [5] ROEPKE C, LIU S. Hybrid Laser Arc Welding of HY - 80 Steel [J]. Welding Journal, 2009: 159—167.

作者简介:



王明林, 男, 1966 年出生, 研究员, 中国船舶重工集团公司第七二五研究所第一研究室主任, 国防科技工业大型构件焊接技术研究应用中心常务副主任。主要从事船体钢焊接材料及焊接工艺研究。近年来承担焊接材料研制及应用研究、焊接工艺优化、材料及工艺模

型考核等各类国防课题近 20 项, 制定的相关焊接材料制造工艺、检验验收标准和焊接原则工艺满足了舰船设计选材和施工建造的急需; 发表论文十余篇, 申请国防发明专利 3 项, 获得国防科技进步二等奖二项。中国造船工程学会会员、中国焊接学会会员。

(编辑: 房威)