

薄板激光-电弧复合焊与双丝MAG电弧焊的接头缺陷对比分析

张辉, 伍道亮, 师金凤, 白丹波, 江亲甲

招商重工(江苏)有限公司 江苏南通 226100

摘要: 船用薄板拼板常采用传统的埋弧焊或焊条电弧焊, 但存在焊接变形大和焊接效率低的问题。激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊作为新型焊接方法, 具有焊接速度快、焊接变形小、焊接道数少, 以及可单面焊双面成形等优点, 在提高焊接速度和生产效率的同时能够显著减小焊接变形。通过介绍激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊两种方法拼接6mm厚的AH36钢板的焊接工艺, 并对出现的焊接缺陷进行比较。结果表明: 拼接薄板时, 激光-电弧复合焊高速高效和防止变形的优势更为突出, 但是激光-电弧复合焊比双丝MAG电弧焊更易出现气孔、飞溅、咬边及未熔合的问题; 两种焊接方法均会出现反面成形不良的问题, 不易出现裂纹和未焊透问题。通过对比分析, 加深对激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊方法的理解, 同时便于船厂对可能出现的缺陷提前进行干预, 选取合适的缺陷检测方案, 也为新工艺的开发提供参考。

关键词: 薄板; 高速高效自动焊; 单面焊; 激光-电弧复合焊; 双丝MAG电弧焊; 焊接缺陷

Comparative analysis of welding defect between hybrid laser arc welding and tandem MAG welding in thin plate

ZHANG Hui, WU Daoliang, SHI Jinfeng, BAI Danbo, JIANG Qinjia

China Merchants Heavy Industry (Jiangsu) Co., Ltd., Nantong 226100, Jiangsu, China

Abstract: Traditional SAW and SMAW method is frequently used for marine thin plate panel welding. However, the high heat input and double-sided welding with back gouging during welding which result in significant deformation. Hybrid laser arc welding and tandem MAG welding as novel welding techniques, facilitate automatic welding with ease and enable one-side welding both sides formation, thereby enhancing welding speed and production efficiency while markedly reducing welding deformation. This study presents panel welding of 6mm thickness AH36 grade steel plate in hybrid laser arc welding and tandem MAG welding methods, compares and consolidates the welding defects encountered. The findings indicate that issues such as pores, excessive spatter, and inadequate forming on back side could all come up when hybrid laser arc welding and tandem MAG welding for thin plates panel welding under stable equipment operation. In comparison to tandem MAG welding method, hybrid laser arc welding approach is more susceptible to undercut and non-fusion issue. Through comparative analysis, the comprehension of hybrid laser arc welding and tandem MAG welding methods is deepened, meanwhile enabling shipyards to proactively address potential defects, and select appropriate defect detect

第一作者: 张辉, 学士, 主要从事船舶与海工焊接技术研究及焊接工艺制作, E-mail: zhanghui9@cmhk.com。

ion strategies, and provide reference for the development of innovative processes.

Keywords: thin plate; high speed and efficiency automatic welding; single side welding; hybrid laser arc welding; tandem MAG welding; welding defect

1 序言

近几年,国内部分船厂开始涉足邮轮及滚装船的建造,这些产品涉及大批量的薄板,在焊接制作中常采用传统的埋弧焊或 CO_2 气体保护焊,具有焊接热输入大、自动化程度较高、焊接速度较快的优点。但焊接热输入大会造成变形大、焊缝烧穿、焊后要校平的问题,并且采用传统的埋弧焊或 CO_2 气体保护焊,需要背面碳弧气刨清根,双面多层多道焊,因此还存在焊接效率低的问题。

激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊作为高速高效的焊接方法,具有焊接速度快、焊接变形小、焊接道数少,以及可单面焊双面成形等优点,已经被国内部分船厂引进,设立专门的薄板制作流水线工位,进行批量的薄板拼板作业^[1, 2]。

对于激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊在船舶领域的应用研究已有一定的成果,但是具体到薄板拼板缺陷还缺少足够的研究。在焊接过程中,焊缝表面和内部出现的缺陷^[3-6],如气孔、咬边、飞溅、未熔合、未焊透及反面成形不良等,会降低焊接接头质量,影响船舶的正常使用。本文采用激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊方法分别拼接6mm厚的AH36船用钢板,并将遇到的焊接缺陷进行比较和总结,以加深对激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊方法的理解,同时便于船厂对可能出现的缺陷提前进行干预,选取合适的缺陷检测方案,也为新工艺的开发提供参考。

2 工艺介绍

2.1 激光-电弧复合焊工艺

6mm厚的AH36船用钢板激光-电弧复合焊,选用光纤激光器和直流脉冲焊接电源,激光器最大功率为16kW,光斑直径为0.3mm,焊接电源型号为PULSE600,激光-电弧复合的方式为电弧焊枪在前、激光头在后,电弧焊枪与激光头直进行走,不摆动焊接。其焊枪装置如图1所示。

激光-电弧复合焊坡口形式如图2所示,I形坡口

采用机械加工方式制备,坡口边的加工残留毛刺、卷边等用手工锉刀修整光滑。在正式焊接前,试板被琴键压在同一高度的钢制平台上,调整根部间隙至0,在试板尾部用纯激光进行定位焊,激光功率为2kW,离焦量为0,焊接速度为300cm/min,定位焊长度为150mm。正式焊接时的焊接速度为250cm/min,激光功率为8~9kW,离焦量为0,焊接电流为240~270A,电弧电压为24~26。用M21混合气保护熔池,气体流量为25~30L/min,用 N_2 进行侧吹,以保护激光头,气体流量为400L/min,焊丝牌号为G4Si1实心焊丝,焊接一道,利用小孔效应实现单面焊双面成形。焊缝成形如图3所示,焊接接头截面宏观形貌如图4所示。

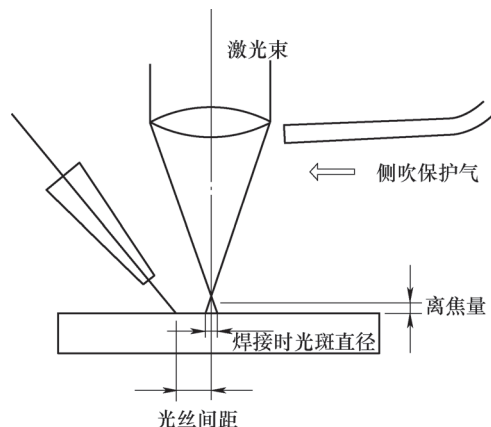


图1 激光-电弧复合焊枪装置

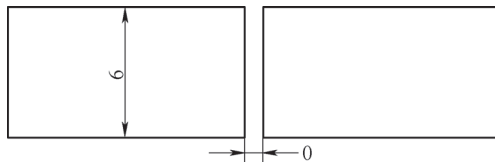


图2 激光-电弧复合焊坡口形式

2.2 双丝MAG电弧焊工艺

6mm厚的AH36船用钢板采用双丝MAG电弧焊,选用两台直流脉冲焊接电源,焊接电源型号PULSE600。两根焊丝按一定的角度置于一个焊枪内,一个焊枪喷嘴内有两个独立的导电嘴,两根焊丝前后排列,分别由各自的电源供电。焊接时两根焊丝形成两个电弧,但共用一个熔池。双丝MAG电



a) 焊缝正面



b) 焊缝反面

图3 激光-电弧复合焊缝成形



图4 激光-电弧复合焊接头截面宏观形貌

弧焊装置如图5所示。

双丝MAG电弧焊坡口形式如图6所示，V形坡口角度为 45° ，采用机械加工方式制备，坡口边的加工残留毛刺、卷边等用手工锉刀修整光滑。在正式焊接前，试板被琴键压在同一高度的钢制平台上，调整根部间隙至5mm。正式焊接的焊接速度为180cm/min，前丝焊接电流为220~240A，电弧电压为24~26V；后丝焊接电流为240~260A，电弧电压为28~30V。用M21混合气保护熔池，气体流量为

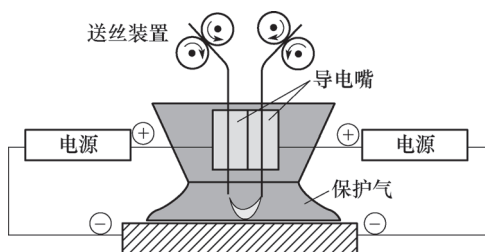


图5 双丝MAG电弧焊装置

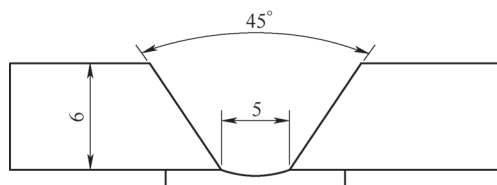


图6 双丝MAG电弧焊坡口形式

20~25L/min，焊丝牌号为G4Si1的实心焊丝，焊接一道，背面采用铜衬垫，实现单面焊双成形。焊缝成形如图7所示，接头截面宏观形貌如图8所示。



a) 焊缝正面



b) 焊缝反面

图7 双丝MAG电弧焊焊缝成形



图8 双丝MAG电弧焊接头截面宏观形貌

3 工艺对比

激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊相同点包括以下7个方面。

- 1) 具有焊接速度快、焊接变形小的优势。
- 2) 焊接熔池需要气体保护。
- 3) 采用脉冲电弧，热输入不大。
- 4) 可实现单面焊接双面成形，焊接效率高。
- 5) 两个热源以一定的相对位置组合在一起，焊接能量大。
- 6) 两个热源焊接参数可以单独设定，焊接调节参数较多。
- 7) 两个热源相互作用在一个熔池里，共同影响焊接过程的稳定性。

激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊的不同点见表1。通过对比可见，激光-电弧复合焊相比于双丝MAG电弧焊，由于有激光束的加入，激光束热源尺寸更小，能量更集中，焊接热影响区更小，填充金属量更少，焊缝熔合面更细窄，宽深比更小，熔池金属冷却更快，高温停留时间更短^[7, 8]，对于薄

表1 激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊不同点

焊接方法	焊接机理	反面成形机理	焊接过程的稳定性影响因素	焊接速度 / (cm/min)	送丝速度 / (m/min)	热输入 / (kJ/cm)	热影响区宽度 /mm	深宽比
激光-电弧复合焊	利用激光的穿透力大、电弧的桥接能力强、综合力学性能好等特点，通过光致等离子体与电弧等离子体物理耦合、激光能量与电弧能量叠加、激光热源与电弧热源相互作用等，实现熔深和熔宽的加大、快速焊接的效果（见图9）	匙孔效应	激光头与电弧焊枪的相对位置不当、激光功率大小不合适、焊接速度过快以及电弧焊的焊接参数不当，会影响等离子体的大小和强度、匙孔效应强弱、焊接温度场分布、熔滴过渡行为，从而改变焊接过程的稳定性	250	10	3.5	0.5	1.2
双丝MAG电弧焊	两个电弧相互叠加，充分利用电弧的能量，产生强烈的热效应，实现较大的熔敷率、快速焊接的效果（见图10）	铜衬垫	两个焊丝间距不合适、焊丝伸出长度不合适、两个焊丝各自的焊接参数不当，影响热量分布和改变电磁力，电弧之间相互干扰，从而改变焊接过程的稳定性	180	前丝：18 后丝：10	4.5	3	0.5

板高速高效焊和防止变形的优势更为突出。

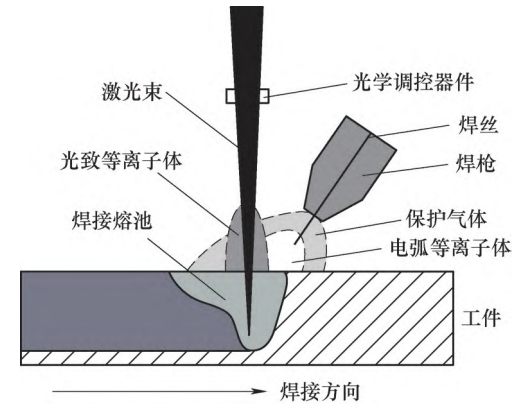


图9 激光-电弧复合焊热源示意

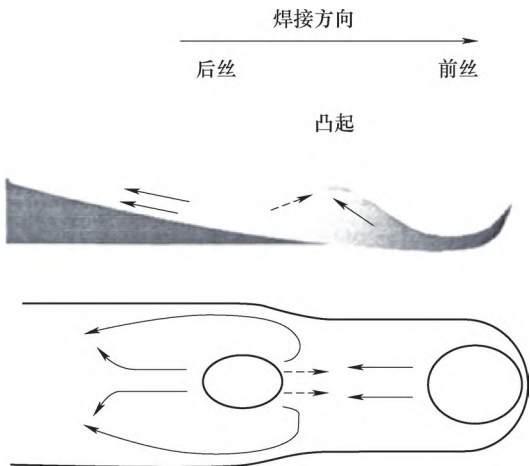


图10 双丝MAG焊热效应示意

4 缺陷对比

在流水线批量拼接6mm厚的AH36船用钢板作业中，当焊接设备稳定运转时，均可能出现气孔、

咬边、飞溅、未熔合及反面成形不良等问题。两种焊接方法有相似处，也各有特殊性，产生缺陷的概率大小及产生的原因也会有区别。

4.1 气孔

在流水线批量拼接6mm厚的AH36船用钢板作业中，采用激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊两种方法，通常均会遇到表面或内部气孔缺陷，如图11所示。



图11 双丝MAG电弧焊焊缝表面气孔

激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊气孔缺陷对比见表2。引起气孔的因素主要分为冶金因素和工艺因素两大类。对于冶金气孔，产生的原因主要是在焊接过程中熔池保护不当、保护气体不纯，以及焊丝、工件或设备表面不干净，两种焊接方法易出现这类气孔；对于工艺气孔，常规弧焊方法产生的原因主要是焊接速度过快、焊丝干伸长过大、焊接电流小而电弧电压高。加入激光束后，小孔的稳定性会影响气孔的形成，而小孔稳定性与焊接参数有关，如果激光功率和离焦量不合适，焊接速度不匹配导致激光小孔波动变化不稳定，特别是熔池底部不稳定更强烈，常在焊缝靠近根部或焊缝中部靠近中心位置出现气孔（见图12），使得激光-电弧复合焊更易出现气孔。

表2 激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊气孔缺陷对比

焊接方法	产生气孔的原因	出现气孔的位置	产生气孔的可能性
激光-电弧复合焊	1) 熔池保护不当 2) 气体不纯 3) 焊丝或工件表面不干净 4) 焊接速度过快 5) 焊丝干伸长过大 6) 焊接电流小、电弧电压太高 7) 激光功率过小 8) 离焦量不合适 9) 光丝距较大	1) 焊缝表面 2) 坡口边缘 3) 焊缝靠近根部 4) 焊缝中部靠近中心	大
双丝MAG电弧焊	1) 熔池保护不当 2) 气体不纯 3) 焊丝或工件表面不干净 4) 焊速过快 5) 焊丝干伸长过大 6) 焊接电流小、电弧电压太高	1) 焊缝表面 2) 坡口边缘	小



图12 激光-电弧复合焊焊缝靠近根部气孔

4.2 飞溅

在流水线批量拼接6mm的AH36船用钢板作业中，采用激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊两种方法，通常会遇到飞溅缺陷，如图13所示。

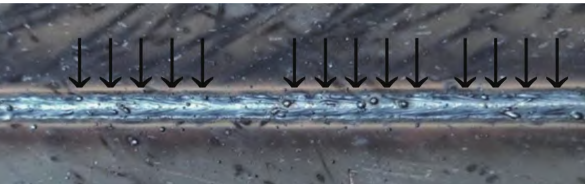


图13 激光-电弧复合焊焊缝表面飞溅

激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊飞溅缺陷对比见表3。焊接飞溅在熔滴过渡时或接触熔池时产生，熔滴的受力状态、熔滴的流动状态和焊接温度场的分布会影响飞溅的产生。常规弧焊方法产生飞溅与电弧的不稳定性有关。加入激光束后，激光小孔附近有金属蒸汽反作用力（见图14），液态金属会由于反作用力喷出形成飞溅，如果激光入射角偏大，激光束焦点偏下，以及光丝距不合适，会导致更强的金属蒸发，使得激光-电弧复合焊更易出现飞溅。

表3 激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊飞溅缺陷对比

焊接方法	产生飞溅的原因	出现飞溅的位置	产生飞溅的可能性
激光-电弧复合焊	1) 保护气体种类 2) 焊丝种类 3) 焊枪角度 4) 焊接电流大 5) 焊丝干伸长过大 6) 外界磁场干扰 7) 激光入射角 8) 光丝距不合适 9) 离焦量偏小	1) 焊缝正面 2) 热影响区正面 3) 热影响区反面	大
双丝MAG电弧焊	1) 保护气体种类 2) 焊丝种类 3) 焊枪角度 4) 焊接电流大 5) 焊丝干伸长过大 6) 两个焊丝间距不合适 7) 外界磁场干扰	1) 焊缝正面 2) 热影响区正面	小

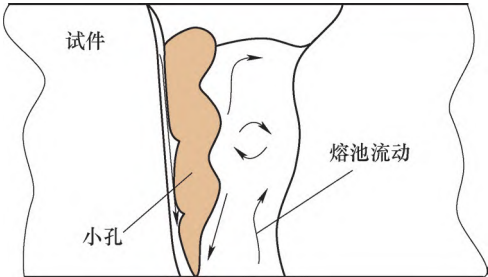


图14 激光小孔附近熔池流动示意

4.3 反面成形不良

激光-电弧复合焊在实现单面焊双面成形时，因为反面无拖住熔池熔液的衬垫，所以对电弧和激光束的匹配有很高的要求，对装配要求也很高，在流水线批量拼接6mm厚的AH36船用钢板作业时，在长焊缝反面易出现内凹及焊瘤，如图15所示。

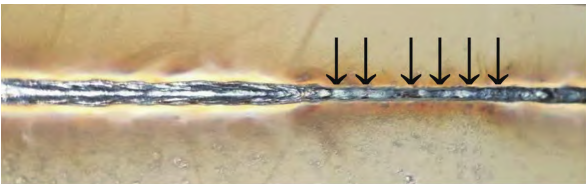


图15 激光-电弧复合焊焊缝反面内凹

双丝MAG电弧焊在实现单面焊双面成形时，虽有衬垫在反面，但是不同于常规手工焊及半自动焊可通过手法操作来控制反面的成形，双丝MAG电弧焊焊接电流大、焊接速度快，对衬垫材质、衬垫形状和焊接参数都有很高的要求，衬垫与衬垫之间不能有接缝，焊缝中心线要始终对准反面衬垫的中心线，装配间隙要大小适中，焊接过程中衬垫不能自

行脱落，或出现脱空形成空隙。在流水线批量拼接6mm厚的AH36船用钢板作业时，在长焊缝中易出现焊瘤及卷边。双丝MAG焊缝反面毛边如图16所示。

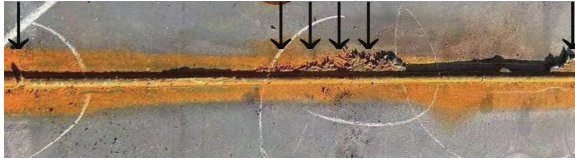


图16 双丝MAG焊缝反面毛边

激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊反面成形不良缺陷对比见表4。由表4可知，两种焊接方法都易出现反面成形不良的问题。

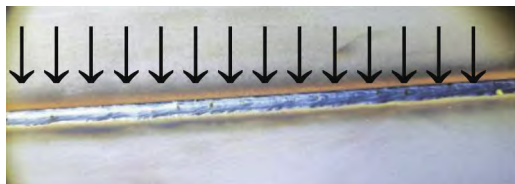
表4 激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊反面成形不良缺陷对比

焊接方法	产生反面成形不良的原因	产生反面成形不良的可能性
激光-电弧复合焊	1) 激光大小不合适 2) 送丝量大小不合适 3) 焊接速度不合适 4) 装配误差大 5) 光丝距不合适 6) 离焦量偏上	大
双丝MAG电弧焊	1) 装配间隙小 2) 板子错边 3) 铜衬垫材质尺寸不合适 4) 铜衬垫未贴紧 5) 铜衬垫中心与板缝不对中 6) 焊接速度过快	大

4.4 未熔合

在流水线批量拼接6mm厚的AH36船用钢板作业中，采用激光-电弧复合焊方法，有时会遇到因偏焊而导致的坡口边未熔合缺陷（见图17），而采用双丝MAG电弧焊方法，未熔合缺陷出现得较少。

常规弧焊方法产生未熔合的主要原因是焊件装配间隙或坡口角度太小、钝边高度太大、焊丝直径



a) 焊缝正面



b) 焊缝反面

图17 激光-电弧复合焊焊缝坡口边未熔合

不对、焊接速度不匹配、热输入偏小、弧长太长及电弧偏在坡口一边等。对于双丝MAG电弧焊，由于坡口角度大、装配间隙大、钝边高度为0，电弧可达性好，两根焊丝互为加热，充分利用电弧的能量实现较大的熔敷，使得熔池里有足够的金属和母材充分熔合，因此未熔合倾向性小。

由于开口角度为0，装配间隙为0，激光的光斑直径仅0.3mm，激光束热源尺寸小，激光束又不摆动，所以激光-电弧复合焊熔合区细窄，焊缝中心及根部宽度不到2mm，并且焊接热输入较小，当放板台子高度有误差或板子装配错边时，激光束未对准焊缝中心，两侧坡口边未完全被激光束熔合在一起，使得焊缝中心及根部易出现坡口边未熔合（见图18）。

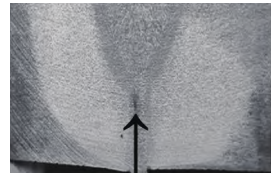


图18 激光-电弧复合焊未熔合焊缝截面形貌

4.5 咬边

在流水线批量拼接6mm厚的AH36船用钢板作业中，采用激光-电弧复合焊方法，常遇到咬边缺陷（见图19）^[9]，而采用双丝MAG电弧焊方法，则咬边缺陷很少出现。

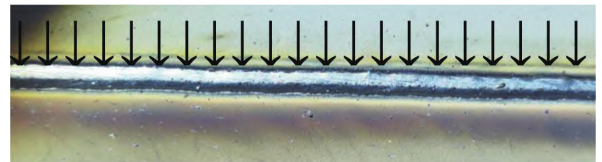


图19 激光-电弧复合焊焊缝咬边

常规弧焊方法产生咬边的主要原因是电弧过硬、电弧电压偏小、送丝量不够、焊枪角度不当及焊丝气体成分不合适等，使得焊缝表面气-液-固三者界面张力的合力指向熔池内部（见图20），向外

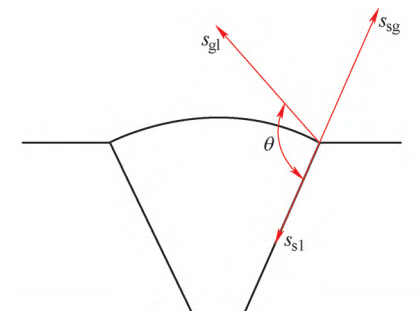


图20 焊缝表面气-液-固界面张力

的流动性差,形成表面咬边。

相比激光-电弧复合焊,双丝MAG电弧焊由于电弧热源相比于激光束热源尺寸大,所以双丝熔敷金属量较单丝的激光-电弧复合焊有所增大,使熔池较长时间保持在较高的温度,有利于降低接触角,促进液体金属和固体之间的润湿和铺展,咬边倾向性小于激光-电弧复合焊。

4.6 裂纹

在流水线批量拼接6mm厚的AH36船用钢板作业中,由于板子薄、接头应力小,所以采用激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊两种方法,无损检测较少发现裂纹问题。

4.7 未焊透

在流水线批量拼接6mm厚的AH36船用钢板作业中,由于板子薄、双热源焊接能量大,对于6mm厚板较易熔透,当焊接设备稳定运转时,采用激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊两种方法,无损检测较少发现未焊透问题。

5 结论与展望

1) 激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊两种方法拼接薄板时,激光-电弧复合焊高速高效和防止变形的优势更为突出,但是激光-电弧复合焊方法相比于双丝MAG电弧焊方法,更易出现气孔、飞溅、咬边及未熔合的问题,二者均会出现反面成形不良的问题,不易出现裂纹和未焊透问题。

2) 未熔合被认为是三大致命焊缝缺陷之一,在国内外钢结构标准中通常都是不允许存在的,对易出现的未熔合问题,在生产应用中应重视,并加大检测力度。

3) 通过对激光-电弧复合焊方法和双丝MAG电弧焊方法拼接船厂薄板遇到的焊接缺陷进行比较和总结,加深对激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊方法的理解,同时便于船厂对可能出现的缺陷提前进行干预,选取合适的缺陷检出方案,也为新工艺的开发提供参考。

4) 激光-电弧复合焊和双丝MAG电弧焊均属于高速高效焊接方法,通过对常见缺陷的不断研究,并取得工艺突破,对这两种方法在船厂的普及应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 魏占静,周大胜,李少农,等. TANDEM双丝焊在造船拼板焊接中的应用[J]. 电焊机, 2007 (6): 45-47.
- [2] 蔡艳,唐卓,吴毅雄. 激光-电弧复合焊焊接工艺在邮轮上的应用[J]. 船舶工程, 2019, 41 (6): 96-100.
- [3] 张培磊,刘庆永,茆宏兆,等. 激光-电弧复合焊接接头缺陷的研究现状[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (1): 31-34.
- [4] 蒋宝,徐富家,杨义成,等. 万瓦级激光-电弧复合穿透焊接成形缺陷研究[J]. 电焊机, 2022, 52 (10): 15-22.
- [5] 尹立孟,王金钊,李勇,等. 激光-电弧复合焊接缺陷形成机理及抑制方法[J]. 激光杂志, 2018, 39 (2): 90-96.
- [6] 胡伟. 双丝焊技术的发展前景与焊接缺陷预防[J]. 企业技术开发, 2009, 28 (3): 85-86.
- [7] 黄鑫,孙博文,王成龙,等. 激光-电弧复合焊与MAG焊接接头组织性能对比研究[J]. 吉林省教育学院学报, 2015, 31 (8): 142-143.
- [8] 周丹,郭计山,喻亮,等. 10mm船用钢MAG焊及激光-电弧复合焊的对比研究[J]. 应用激光, 2021, 41 (1): 99-106.
- [9] 高明,曾晓雁,胡乾午,等. 激光-电弧复合焊接咬边缺陷分析及抑制方法[J]. 焊接学报, 2008 (6): 85-88, 117.

MW 20240525