

10Ni3CrMoV 钢 T 型接头 CO₂ 激光复合 焊工艺与组织

胡连海¹ 黄 坚^{1,*} 倪慧峰² 吴毅雄¹

(¹上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)

²江南造船(集团)有限责任公司, 上海 201913

摘要 激光复合焊接综合了激光焊和电弧焊的优点,使其成为船用大厚度钢板高效焊接最有前景的方法之一。研究了船用钢板的高功率 CO₂ 激光焊接工艺,重点分析了保护气体成分对焊缝化学成分的影响,激光与电弧间距对焊接过程稳定性的影响。在工艺参数优化的基础上实现 14 mm 厚 10Ni3CrMoV 钢板的高功率激光 T 型结构焊接。获得的焊缝通过 X 光探伤检验,没有发现裂纹,存在少量不连续的小气孔。采用光学显微镜分析了焊接接头微观组织,结果表明,微观组织显示了焊接接头较好的综合力学性能,尤其是经历重熔与热处理后的焊缝组织发生明显细化。测试了焊接接头不同部位的硬度,焊接接头最大硬度小于 360 HV,符合船用技术要求。

关键词 激光技术; T 型接头; 激光复合焊; 保护气体; 等离子体; 微观组织; 硬度

中图分类号 TG456.7; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0303003

CO₂ Laser Hybrid Welding Processes and Microstructures of 10Ni3CrMoV Steel in T Joint Form

Hu Lianhai¹ Huang Jian¹ Ni Huifeng² Wu Yixiong¹

(¹ Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China
² Jiangnan Shipyard (Group) Co., Ltd., Shanghai 201913, China)

Abstract Laser hybrid welding has become one of the most promising welding methods used to weld ship thickness steel plates with high efficiency due to combining the advantage of laser welding and arc welding. CO₂ laser hybrid welding processes of ship steel plates are studied. The influences of the shielding gas composition on the chemical composition of weld and the distance between the laser beam and arc on the stability of the welding process are mainly analyzed. Based on the optimizing process parameters, 10Ni3CrMoV steel plates with a thickness of 14 mm are welded on both sides in T joint form using high-power laser hybrid welding. The welds produced are assessed by X ray. No crack is found and there is only a small amount of pores. The microstructures of welded joints are examined by optical microscope. The results show that the microstructure of welded joints has good comprehensive mechanical properties. Especially after the weld overlap region experiences a re-melting and heat treatment, the microstructure is refined. The microhardness of welded joints is tested in different regions. The maximum hardness of welded joints is less than 360 HV. The welds obtained can meet the technical requirements for shipbuilding industry.

Key words laser technique; T joint; laser hybrid welding; shielding gas; plasma; microstructure; hardness

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.5400; 350.3850

收稿日期: 2010-08-24; 收到修改稿日期: 2010-11-09

基金项目: 国家级项目(B1420080218)资助课题。

作者简介: 胡连海(1975—),男,博士研究生,讲师,主要从事激光工艺及激光物理等方面的研究。

E-mail: lianhai_hu@sjtu.edu.cn

导师简介: 吴毅雄(1952—),男,教授,博士生导师,主要从事激光制造及过程控制等方面的研究。

E-mail: yxwu@sjtu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jhuang@sjtu.edu.cn

1 引 言

在造船工业中,需要大量的 T 型结构,传统的 T 型结构焊接一般采用手工电弧焊、熔化极气体保护焊和多丝埋弧焊等焊接方法,在焊接厚板时需要开坡口,使得在实际生产中增加了准备工序和焊接加工的时间,从而造成生产效率下降和焊接成本增加等问题^[1]。

如今在造船领域焊接中越来越要求降低生产成本,提高产品质量,激光-电弧复合焊接的发展能够很好满足这一要求。与传统的电弧焊接相比,激光-电弧复合焊接具有低热输入、高焊速、较少的焊接材料消耗、较窄的热影响区(HAZ)、极小的变形和优异的焊接接头力学性能等特点^[2~4]。自 20 世纪 90 年代以来,激光复合焊接已在欧洲造船厂获得了广泛应用^[5]。

然而影响激光复合焊接过程稳定性的工艺因素是很多的,包括保护气体种类、激光功率、焊接电流、电弧电压、焊接速度、离焦量以及激光与电弧间距等。在实际应用上往往需要进行大量的实验以获得最佳工艺参数,从而限制了它的应用。本文重点研究了保护气体成分对焊缝化学成分的影响,以及采用高速摄影系统研究了激光与电弧间距对焊接过程稳定性的影响,确定了在合适保护气体配比下的最佳激光与电弧间距,并对在优化的工艺参数下获得的焊接接头的微观组织和性能进行了分析。

2 实验设备与方法

实验采用德国 TRUMPF 公司生产的 TLF15000CO₂ 激光器,其最大输出功率为 15 kW,

输出波长为 10.6 μm,焦距为 350 mm,焦点半径为 0.43 mm。实验采用的 MAG 电弧焊机为 KEMPPi 公司生产的 Kemppi Pro 增强型焊机。采用激光复合焊接方法实现船用 T 形接头两侧角焊缝的焊接,焊接装置如图 1 所示。试样不开坡口,激光束与面板成角度 8°~10° 倾斜入射,激光束与腹板的距离约为 1 mm。MAG 焊枪与腹板的夹角为 45°。焊接时将装置向左旋转 45°,使得成为船形位置焊接。

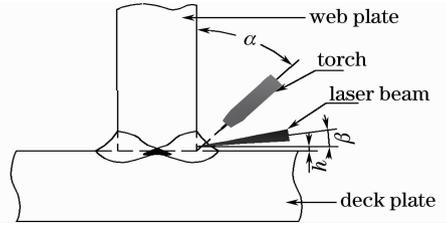


图 1 T 型结构激光焊接装置

Fig. 1 Laser welding setup in T joint form

3 激光复合焊接工艺

3.1 保护气体组分

焊接接头的性能取决于焊缝化学成分和组织等,不同保护气体的激光复合焊接对焊缝金属元素的蒸发和焊缝金属净化的作用不同,从而导致焊缝化学成分不同,因此选择合适的保护气体是重要的^[6]。对气体成分分别为 75% He+25% Ar, 50% He+50% Ar 和 10% CO₂+60% He+30% Ar 进行焊接实验,采用的激光功率为 12 kW,送丝速度为 12 m/min,焊接速度为 1.2 m/min,侧吹气体为 He,流量为 30 L/min,对获得的焊缝金属进行化学成分分析,实验结果如表 1 所示。

表 1 不同保护气体的焊缝金属的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of weld metal with different shielding gases (mass fraction, %)

Specimens	Chemical composition				
	C	Si	Mn	Ni	Cr
Base metal	0.12	0.21	0.36	2.78	0.97
Wire	0.06	0.50	1.49	2.65	0.16
Weld metal					
75% He+25% Ar	0.08	0.34	0.60	2.69	0.75
50% He+50% Ar	0.09	0.35	0.63	2.72	0.78
10% CO ₂ +60% He+30% Ar	0.09	0.18	0.49	2.71	0.78

碳能有效提高钢的强度,但能显著降低钢的韧性,因此焊缝中碳含量不能太高,以使钢获得强度和韧性的良好匹配。从表 1 中可以看出,采用不同保护气体的碳质量分数均低于 0.10%,满足要求。硅和锰一方面使焊缝金属充分脱氧,另一方面提高焊缝的抗拉强度,但随着含量的增加,会降低韧性,因

此必须严格控制硅、锰含量^[7]。比较焊丝与焊缝的 Si 和 Mn 含量看出, Si 和 Mn 元素在焊接过程中的烧损是比较大的,尤其是对于加入体积分数为 10% 的 CO₂ 活性气体保护,由于氧化烧损,导致 Si 和 Mn 的含量进一步减少,有利于提高焊缝的韧性。

Ni 元素能显著提高钢的韧性,降低钢的脆性转

变温度,通常都在 2%~5% 范围内。从表 1 可以看出,不同保护气体对于焊缝金属中 Ni 元素的含量影响不大,而且基本与母材和焊丝的含量相当。铬主要用来提高淬透性,尤其对于大厚度钢板,添加适量的铬,以保证在整个厚度上钢板有足够的淬透性。不同保护气体获得的焊缝的 Cr 元素的含量差异不大。

总之,不同气体对焊缝化学成分影响主要体现在 Si, Mn 上,对 C, Ni, Cr 的影响很小。活性气体 CO₂ 的加入,能更有效地降低 Si 和 Mn 含量,此外加入的 CO₂ 能够稳定电弧,减少熔池的表面张力,使得在焊缝表面和根部的过渡平缓,减少咬边^[6]。因此采用 10%CO₂+60%He+30%Ar 的混合气体作为保护气体。

3.2 激光与电弧间距

在激光复合焊接中,激光主要是起到加热和稳定电弧作用,使得能够实现在高速下的稳定焊接,然而为了实现激光与电弧良好的耦合以获得稳定的焊接过程,必须选择合适的激光与电弧的间距 D_{LA} ^[8~10]。通过采集激光与电弧间距在 2~8 mm 范围内变化时的电信号和等离子体影像,来确定激光与电弧最佳间距。采用电信号采集系统记录电流和电压信号,用以评价焊接过程的稳定性,采样频率为 20 kHz。所用的彩色高速摄像仪由 PHOTRON 公司生产,型号为 FASTCAM Super 10 K,高速摄影系统以 3000 frame/s 的速度对激光光致等离子体和电弧等离子体进行实时跟踪拍摄。在焊接过程中,摄影镜头与钢板在同一水平面上,与焊接方向垂直,保持激光束和焊枪不动,通过行走小车移动工件实现焊接和拍摄。采用的激光功率为 12 kW,送丝

速度为 12 m/min,焊接速度为 1.2 m/min,侧吹气体为 He,流量为 30 L/min,保护气体为 10%CO₂+60%He+30%Ar,流量为 30 L/min。图 2 为对应不同 D_{LA} 的等离子体形态。 $D_{LA}=2$ mm 的等离子体形态显示,耦合后的等离子体体积较大,亮度更强,电子密度更大,对激光的吸收和折射使得达到工件的激光能量及能量密度大大降低,对激光有很强的屏蔽作用,影响焊缝的熔深,因此耦合效果不好。从 $D_{LA}=4$ mm 的等离子体形态可以看出,激光光致等离子体和电弧等离子体耦合在一起,形成一个复合等离子体,耦合后的等离子体体积较小,大小和形态比较稳定,进而导致熔滴过渡平稳,焊接过程稳定。从 $D_{LA}=6$ mm 的等离子体形态可以看出,激光光致等离子体时而吸引电弧等离子体耦合成一个等离子体,时而略微分开,导致电弧形态变化剧烈,进而使得熔滴所受的电场力和等离子体流力的大小和方向不断发生变化,熔滴过渡复杂,焊接过程不稳定。从 $D_{LA}=8$ mm 的等离子体看出,两个等离子体基本呈分离状态,仅通过微弱的导电通道存在联系,不存在耦合作用。因此综合以上情况, $D_{LA}=4$ mm 的耦合情况较好。

图 3 为其中两种不同 D_{LA} 激光复合焊接时的电流和电压波形,在 $D_{LA}=4$ mm 时的电流和电压波形波动非常小,焊接过程比较稳定。在 $D_{LA}=6$ mm 时的电流和电压波形的波动都较大,出现了大量短路过渡,焊接过程非常不稳定。因此在 $D_{LA}=4$ mm 的时候激光光致等离子体和电弧等离子体耦合最佳,焊接过程稳定。

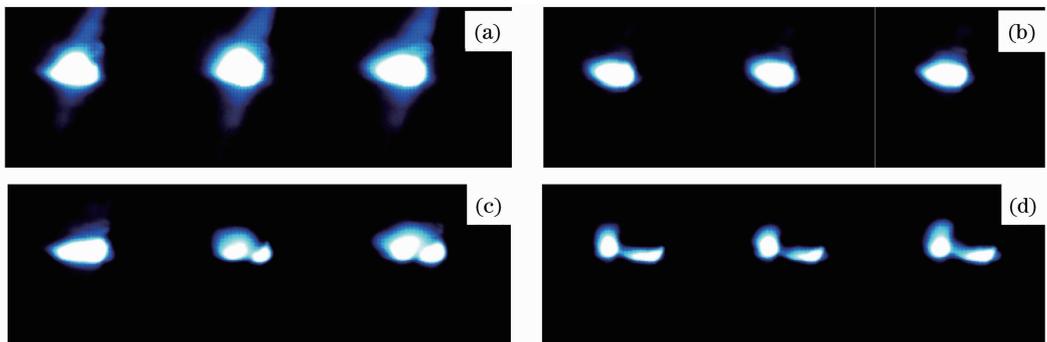


图 2 不同 D_{LA} 激光复合焊接时的等离子体。(a) $D_{LA}=2$ mm, (b) $D_{LA}=4$ mm, (c) $D_{LA}=6$ mm, (d) $D_{LA}=8$ mm

Fig. 2 Plasma caused by laser hybrid welding at different D_{LA} . (a) $D_{LA}=2$ mm, (b) $D_{LA}=4$ mm, (c) $D_{LA}=6$ mm, (d) $D_{LA}=8$ mm

3.3 其他主要焊接工艺参数

经过大量试验,分析激光功率、焊接速度、送丝速度及气体流量对焊缝成形和内在质量的影响,得

出 CO₂ 激光复合焊工艺参数如表 2 所示。通过 X 射线检测焊缝缺陷,焊缝不存在裂纹,仅有少量不连续小气孔,具有较好质量,能够满足船用技术要求。

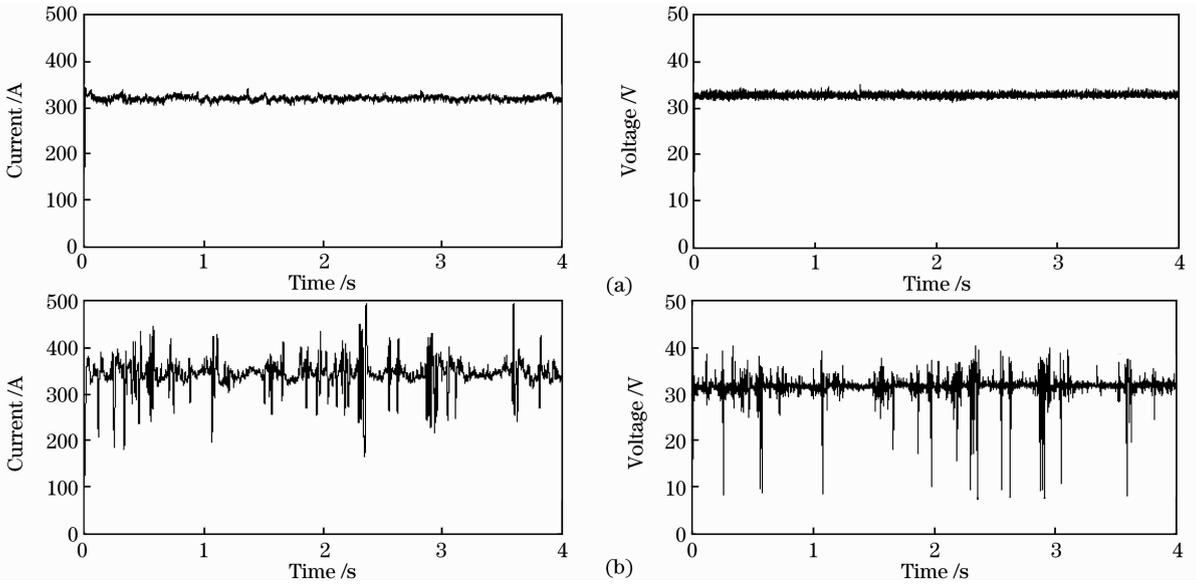


图 3 不同 D_{LA} 激光复合焊接时的电流和电压。(a) $D_{LA} = 4$ mm, (b) $D_{LA} = 6$ mm

Fig. 3 Current and voltage at different D_{LA} in laser hybrid welding. (a) $D_{LA} = 4$ mm, (b) $D_{LA} = 6$ mm

表 2 激光复合焊接工艺参数

Table 2 Laser hybrid welding process parameters

Stick-out / mm	Gas flow rate / (L/min)	Focal point / mm	Laser power / kW	Welding speed / (m/min)	Welding current / A	Arc voltage / V
16	30	-2	12	1.1	362	36.8

4 结果与讨论

4.1 T型接头横截面宏观形貌

图 4 为焊接接头的横截面宏观形貌。两道焊缝很好地熔合搭接在一起,没有出现未焊透情况,焊缝表面呈现凹型,有利于提高疲劳强度。HAZ 的宽度很窄,大约有 2 mm。

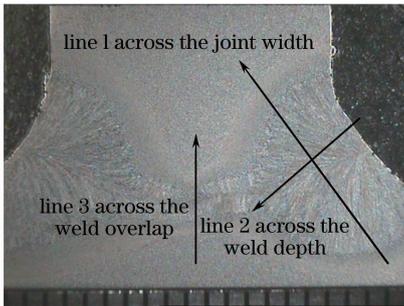


图 4 接头横截面宏观形貌

Fig. 4 Macro-section of laser welded T joints

4.2 T型接头显微组织

激光焊接接头的微观组织如图 5 所示。图 5(a)为焊缝的微观组织,主要由少量的针状铁素体、粒状贝氏体和大量的板条马氏体组成。针状铁素体能够改善焊缝的冲击韧性,防止裂纹的扩展。由于激光焊接具有低热输入和高的焊接速度,形成

的板条马氏体比常规焊接方法要细小,有利于提高焊缝的韧性和强度。图 5(b)中粗晶区的显微组织为粗大的马氏体组织,是焊接接头性能最恶劣的区域。因为激光复合焊接接头粗晶区很窄,降低了其对焊接接头性能的影响^[11,12]。图 5(c)为细晶区的光学显微组织,主要为马氏体+少量粒状贝氏体,组织非常细小。图 5(d)为焊接接头两相区的光学显微组织,其组织为粒状贝氏体和回火索氏体。

图 6(a)是 HAZ 重叠区的光学显微组织,主要为细小的粒状贝氏体和少量铁素体。图 6(b)是焊缝重叠区的光学显微组织,为粒状贝氏体、马氏体和少量针状铁素体。此区域的焊缝金属经过两次高温加热与快速冷却后,与激光焊的原始焊缝组织相比,组织更加细小,具有细晶强化作用,焊缝重叠区正如同一个强韧性很好的纽带连接着左右两道焊缝,对 T 型接头的牢固结合起到了至关重要的作用。

4.3 接头显微硬度分析

为了全面衡量硬度分布情况,分别在焊接接头、焊缝以及焊缝重叠区打了 3 条硬度线。T 型接头显微硬度打点位置如图 4 所示。硬度线 1 的测试范围包括母材、热影响区和焊缝。从图 7(a)曲线可以看出复合焊接头的硬度最高值位于粗晶区,硬度为

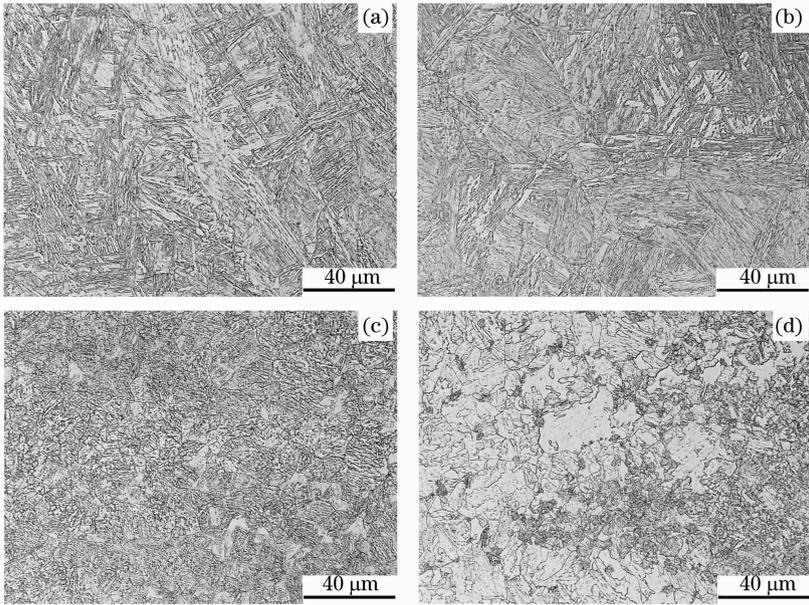


图 5 激光焊接接头显微组织。(a)焊缝,(b)粗晶区,(c)细晶区,(d)两相区

Fig. 5 Microstructures of laser welded joints. (a) fusion zone, (b) coarse grained region, (c) fine grained region, (d) partially austenitic region

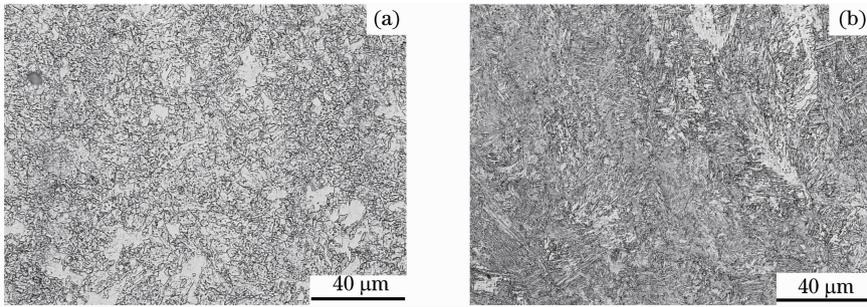


图 6 激光焊缝重叠区显微组织。(a)HAZ 重叠区,(b)焊缝重叠区

Fig. 6 Microstructures of overlap region. (a) overlap region of HAZ, (b) overlap region of weld

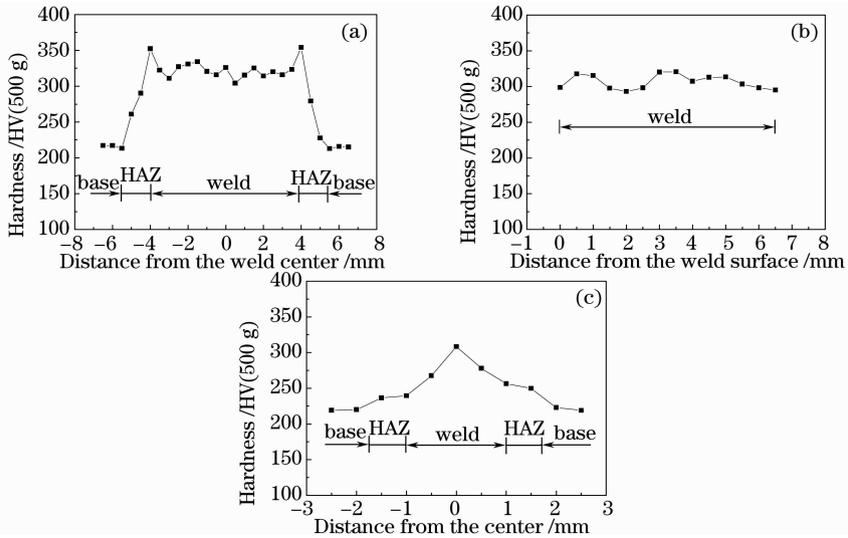


图 7 T 型接头显微硬度分布。(a)沿着焊接接头宽度,(b)沿着焊缝深度,(c)沿着焊缝重叠区

Fig. 7 Hardness distribution of T welded joints. (a) across the joint width, (b) across the weld depth, (c) across the weld overlap

355 HV 左右,这是由于粗晶区居于主导的粗大的马氏体硬度较高而造成的。硬度线 2 主要测试从焊缝表面到焊缝内部的硬度分布。从图 7(b)可以看出硬度分布比较平坦,变化不大。硬度线 3 主要测试焊缝重叠区的硬度分布,从图 7(c)可以看出,硬度峰值点出现在焊缝中心。

5 结 论

1)10Ni3CrMoV 钢激光复合焊接中,不同气体对焊缝化学成分影响主要体现在 Si 和 Mn。综合焊缝成分和工艺性,采用 10%CO₂+60%He+30%Ar 的混合气体。分析等离子体间的相互作用以及电信号,确定激光与电弧间距为 4 mm。

2)T 型接头的焊缝微观组织由大量的板条马氏体、少量的针状铁素体和粒状贝氏体组成,较窄的粗晶区为粗大的马氏体组织,重叠区经过两次热循环后组织细化,显示了焊接接头的较好力学性能,硬度值在粗晶区达到最大值 355 HV。

3)采用优化的工艺参数实现了双面 T 型结构的焊接,通过 X 射线检测焊缝,没有裂纹,存在少量小气孔,焊缝质量满足船用要求。

参 考 文 献

- 1 S. Webster, J. K. Kristensen, D. Petring. Joining of thick section steels using hybrid laser welding [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2008, **35**(7): 496~504
- 2 Qi Junfeng, Niu Zhen, Zhang Dongyun *et al.*. Control of shaping of welds for CO₂ laser welding shipbuilding T-section aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 297~302

祁俊峰,牛 振,张冬云等. CO₂ 激光焊接船用铝合金 T 型材

的焊缝成型控制[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 297~302

- 3 A. Mahrle, E. Beyer. Hybrid laser beam welding-classification, characteristics, and applications [J]. *J. Laser Appl.*, 2006, **18**(3): 169~180
 - 4 Hu Lianhai, Huang Jian, Li Zhuguo *et al.*. Microstructure and properties of high power CO₂ laser welded pipeline steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3174~3178
- 胡连海,黄 坚,李铸国等. 高功率 CO₂ 激光焊接管线钢接头的组织与性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3174~3178
- 5 F. Roland, L. Manzon, P. Kujala *et al.*. Advanced joining techniques in european shipbuilding [J]. *J. Ship Prod.*, 2004, **20**(3): 200~210
 - 6 A. Fellman, V. Kujanpää. The effect of shielding gas composition on welding performance and weld properties in hybrid CO₂ laser-gas metal arc welding of carbon manganese steel [J]. *Laser Appl.*, 2006, **18**(1): 12~20
 - 7 Zhang Wenyue. *Welding Metallurgy* [M]. Beijing: China Machine Press, 1996. 152~153
- 张文钺. *焊接冶金学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996. 152~153
- 8 U. Stute, R. Kling, J. Hermsdorf. Interaction between electrical arc and Nd: YAG laser radiation [J]. *Annals of the CIRP*, 2007, **56**(1): 197~200
 - 9 Wu Shikai, Xiao Rongshi, Yang Wuxiong *et al.*. Characteristics comparison of laser-TIG arc interaction using high power CO₂ and Yb: YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2667~2671
- 吴世凯,肖荣诗,杨武雄等. 高功率 CO₂ 及 Yb: YAG 激光与 TIG 电弧相互作用特性对比 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2667~2671
- 10 B. Hu, G. Ouden. Laser induced stabilisation of the welding arc [J]. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 2005, **10**(1): 76~81
 - 11 P. L. Moore, D. S. Howse, E. R. Wallach. Microstructures and properties of laser/arc hybrid welds and autogenous laser welds in pipeline steels [J]. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 2004, **9**(4): 314~322
 - 12 Yang Xichen, Wang Yu, Ying Chaolong *et al.*. Microstructure and properties of high power laser welding of ship steel plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 866~870
- 杨洗陈,王 雨,应朝龙等. 高功率激光焊接船板的组织性能 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 866~870