

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2022.03.08

30CrMnSi钢激光-电弧复合焊接工艺研究

滕彬¹, 范东辉², 蒋宝¹, 曹浩¹, 聂鑫¹, 黄瑞生¹

1. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028

2. 中国兵器工业集团 航空弹药研究院有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150030

摘要: 30CrMnSi钢采用激光自熔焊接时产生裂纹的几率较高,且焊缝正面易出现下塌现象,无法满足生产使用要求。以5 mm厚30CrMnSi为研究对象,通过接头形貌分析、射线探伤检测及力学性能检验,进行了激光-电弧复合焊接工艺开发。结果表明,采用激光-电弧复合焊接方法且激光在前、电弧在后时可实现该型号材料的单面焊接双面成形,焊缝成形均匀美观;在Y型坡口、坡口角度60°、钝边3 mm的坡口条件下,采用激光功率3 000 W、焊接电流90 A可有效避免焊缝内部特别是搭接处产生裂纹;接头平均抗拉强度为1 106 MPa,达到母材的90%;接头过热区组织以晶粒粗大的马氏体为主,是热影响区硬度大幅提高的主要原因。

关键词: 30CrMnSi钢; 激光-电弧复合焊; 裂纹; 抗拉强度

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2022)03-0059-06

Study on the Laser-Arc Hybrid Welding Technology of 30CrMnSi Alloy

TENG Bin¹, FAN Donghui², JIANG Bao¹, CAO Hao¹, NIE Xin¹, HUANG Ruisheng¹

1. Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China

2. China North Industry Group Aviation Ammunition Institute, Harbin 150030, China

Abstract: When 30CrMnSi steel is welded by laser self-fusing welding, the probability of crack is still high, and the front side of the weld is prone to collapse under the phenomenon, can not meet the requirements of production use. Results indicate the laser-arc hybrid welding method can realize the single face welding and double face forming of this alloy, and the welding seam is uniform and elegant. When the laser power is 3 000 W and the welding current is 90 A, the internal crack, especially the crack in the lap joint, can be effectively avoided with 3 mm root face. The average tensile strength of the joint is 1 106 MPa, which is 90% of the base metal. The microstructure in the overheated zone of the joint is mainly composed of the coarse martensite, which is the main reason for the increase of hardness.

Keywords: 30CrMnSi steel; laser-arc hybrid welding; crack; tensile strength

引用格式: 滕彬, 范东辉, 蒋宝, 等. 30CrMnSi钢激光-电弧复合焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2022, 52(3): 59-64.

Citation: TENG Bin, FAN Donghui, JIANG Bao, et al. Study on the Laser-Arc Hybrid Welding Technology of 30CrMnSi Alloy[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(3): 59-64.

0 前言

30CrMnSi钢是一种中碳合金钢,因其不含贵重的Ni,且具有高的强度(抗拉强度达到1 100 MPa以上)和韧性,在相同受力条件下,所需材料厚度小于普通碳钢,可达到结构减重的目的,因此广泛应用于

军民品零部件的生产和制造中^[1]。但是30CrMnSi钢的碳当量较高且加入的合金元素较多,淬硬倾向严重,焊接时易产生裂纹等缺陷^[2-3]。目前,30CrMnSi钢的主要焊接方法为钨极氩弧焊,为防止冷裂纹,除了采取预热措施外,焊后还必须及时进行回火处理,这大大降低了实际的生产效率^[4]。

* 收稿日期: 2021-05-25 修回日期: 2021-08-10

作者简介: 滕彬(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事激光及激光电弧复合焊接工艺及装备开发工作。E-mail: tengbin134@163.com。

随着激光焊接技术的发展,30CrMnSi 钢的激光焊接成为重要发展方向之一。雷华东^[5-6]等采用激光焊接 30CrMnSiA 钢,在不进行焊前预热和焊后热处理的情况下,接头抗拉强度与母材基本等强度,热影响区硬化、脆化和软化等性能上的变化并不显著,激光焊接工艺参数选定的主要出发点是防止裂纹和保证焊缝表面成形质量。石岩^[7]等采用 CO₂ 激光对 2 mm 厚的 30CrMnSi 钢进行焊接试验,接头抗拉强度高于母材,母材断口呈典型的韧窝形态,为韧性断裂,热影响区发生脆性断裂,断口呈准解理断裂。但是,采用激光自熔焊接时产生裂纹的几率仍然较高,且焊缝正面易出现下塌现象,无法满足生产使用要求。激光-电弧复合焊既有激光焊热源能量密度高、可焊接厚板的优势,又具有电弧焊间隙适应性强的优点,同时熔化极焊丝填充金属能够促进焊缝圆滑过渡,提高间隙搭接能力,降低工件装配难度,可有效提高焊接速度。杨斯达^[8]采用激光-MAG 复合焊焊接 8 mm 厚度 30CrMnSiA 钢,获得了成形优良的焊接接头,但收弧端容易产生表面裂纹和内部裂纹,这两种裂纹均属于高温下产生的结晶裂纹,采用小规范多层焊对抑制裂纹有效果。刘天亮^[9]对厚度 10 mm 的 30CrMnSiA 试板,进行光纤激光-GMA 复合焊接特性研究,发现单层焊时出现明显的裂纹和未焊透缺陷,多层焊时焊缝成形美观、均匀一致,焊缝内部无气孔和裂纹等焊接缺陷。

本研究针对 5 mm 厚度的 30CrMnSi 筒体部件,通过激光-电弧复合焊接试验进行工艺开发,并利用射线探伤检测、焊缝形貌分析、力学性能测试评价 30CrMnSi 激光-电弧复合焊的可行性,最终获得该材料的最佳焊接工艺参数。

1 试验设备与方法

试验采用激光-电弧复合焊接方法。试验设备为 IPG 公司的 YLS-30000 光纤激光器和福尼斯的 TPS4000 型数字化 CMT 焊机组成的焊接试验系统,光纤激光器最大输出功率为 30 kW,激光器波长 1 070 nm,最小光斑直径 0.5 mm,CMT 焊机最大输出电流为 400 A。试验材料为 5 mm 厚 30CrMnSi,抗

拉强度为 1 227.5 MPa,试件开 Y 型坡口,坡口角度 60°,无间隙。填充焊丝采用 HS80,直径 1.2 mm,母材及焊丝的化学成分如表 1 所示。焊前用砂纸将待焊端面及两侧进行除锈处理,然后用酒精将表面油污擦拭干净。用专用夹具将对接板夹紧并通过 4 点点焊方式进行固定,同时检查错边量及变形量,选用错边及变形小的试件进行焊接。激光-电弧复合焊接过程中采用激光在前、电弧在后的方式。

表 1 母材及焊丝主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base metal and welding wire (wt. %)

材料	C	Cr	Mn	Si
母材	0.27~0.34	0.8~1.1	0.8~1.1	0.9~1.2
HS-80 焊丝	0.08	0.23	1.3	0.42

采用单一因素变量的方法,研究坡口尺寸、激光功率、焊接电流对焊缝成形及接头组织性能的影响规律。具体试验条件及工艺参数如表 2 所示。

表 2 焊接试验参数

Table 2 Welding test parameter

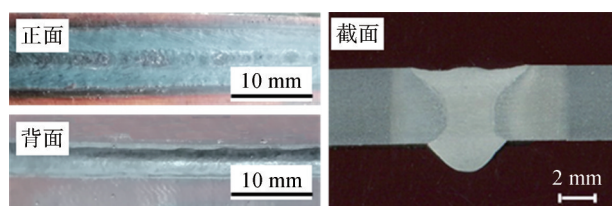
编号	坡口类型	钝边尺寸 /mm	激光功率 P/W	焊接电流 I/A
1	Y	2	2 800	110
2	Y	2	3 000	115
3	Y	3	2 800	82
4	Y	3	3 000	90
5	Y	3	3 500	105

2 试验结果与分析

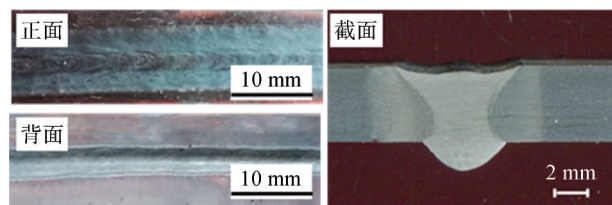
2.1 焊接工艺

在 2 mm 钝边的坡口形式条件下,采用两种激光功率和焊接电流组合(2 800 W+110 A,3 000 W+115 A)进行焊接试验(单层焊一次焊透)研究,焊缝形貌如图 1 所示。由图可知,钝边为 2 mm 时,在较小的激光功率和送丝速度条件下,虽然背面成形良好,但是焊缝上表面仍产生了较为明显的塌陷。

为获得更加优良的焊缝成形,抑制焊缝塌陷,同时减少熔敷金属的填充量,减小焊接变形,将钝边尺寸改为 3 mm 进行试验研究,焊缝形貌如图 2 所示。由图可知,3 种激光功率和焊接电流的组合参数均实现了单面焊双面成形,焊缝均匀一致、无塌陷、咬边等缺陷。其中,4#焊缝(激光功率 3 000 W、



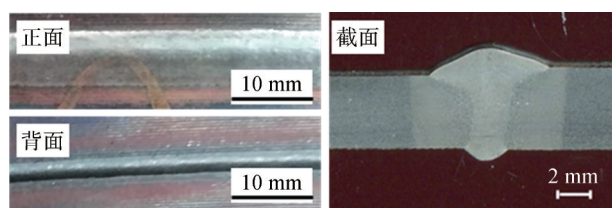
(a) 1#焊缝(激光功率 2 800 W, 焊接电流 110 A)



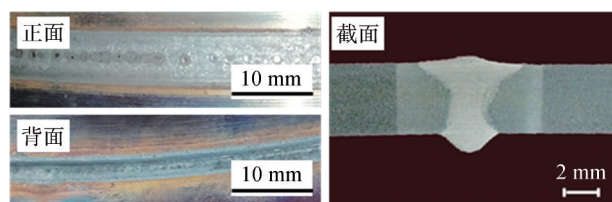
(b) 2#焊缝(激光功率 3 000 W, 焊接电流 115 A)

图1 激光-电弧复合焊焊缝形貌(2 mm 钝边)

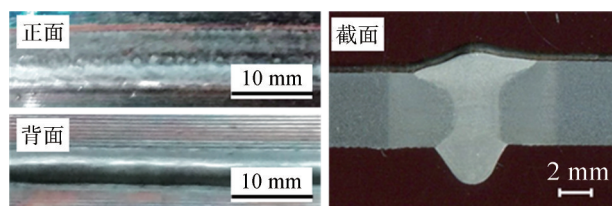
Fig. 1 Morphology of the laser-arc hybrid welding joint (2 mm root face)



(a) 3#焊缝(激光功率 2 800 W, 焊接电流 82 A)



(b) 4#焊缝(激光功率 3 000 W, 焊接电流 90 A)



(c) 5#焊缝(激光功率 3 500 W, 焊接电流 105 A)

图2 激光-电弧复合焊接焊缝形貌(3 mm 钝边)

Fig. 2 Morphology of the laser-arc hybrid welding joint (3 mm root face)

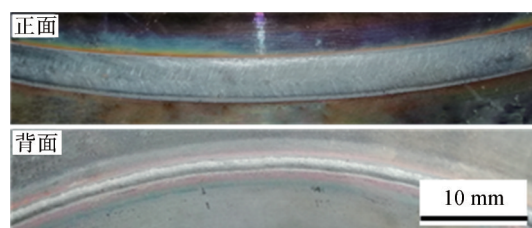
焊接电流 90 A) 的成形更加均匀美观, 同时焊缝余高更小, 无需后续的车削加工。

根据以上工艺试验, 选用激光功率 3 000 W、焊接电流 90 A、开钝边 3 mm 的 Y 型坡口对 5 mm 厚 30CrMnSi 进行焊接, 并对接头进行 X 射线探伤检测

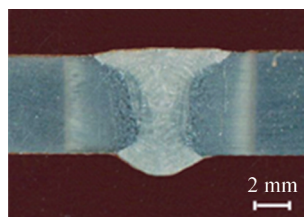
及组织性能检测。接头形貌如图 3 所示。由图可知, 焊缝连续、均匀、美观, 无咬边、表面裂纹、表面气孔等缺陷。同时检测焊前和焊后试件尺寸(见图 4), 激光-电弧复合焊变形较小, 焊接变形小于 0.1 mm, 同时背面余高维持在 1.3~1.6 mm 之间, 焊缝成形均匀稳定。



(a) 模拟件焊后效果



(b) 焊缝正反面形貌



(c) 断面形貌

图3 5 mm 模拟件激光-电弧复合焊接接头形貌

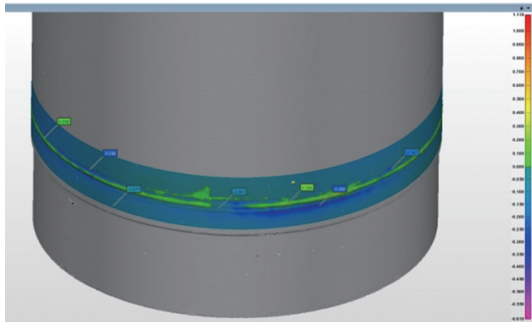
Fig. 3 Morphology of laser-arc hybrid welding joint of a 5 mm simulation workpiece

2.2 接头 X 射线探伤检测

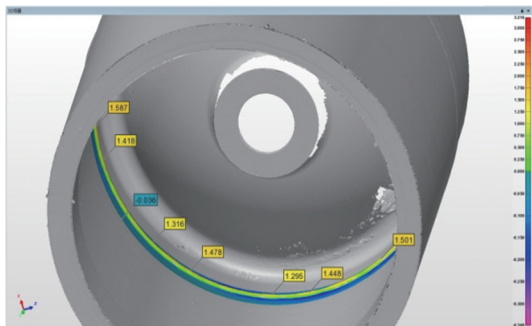
依据行业标准 NB/T 47013.2 2015《承压设备无损检测第 2 部分射线检测》进行 X 射线探伤检测, 局部探伤照片如图 5 所示。经检验, 焊缝内部特别是接头首尾搭接处均无裂纹和气孔产生。

2.3 接头力学性能检验

对接头进行拉伸试验及硬度试验, 其中拉伸试样按照行业标准 NBT47014-2011《承压设备焊接工艺评定》加工, 取样 2 个结果取平均值; 硬度试验按照 GB/T 4340.1-2012《金属材料维氏硬度试验》进行。



(a) 焊接接头变形情况



(b) 焊缝背面余高检测

图4 5 mm 模拟件激光-电弧复合焊接接头尺寸检测

Fig. 4 Dimension inspection of the laser-arc hybrid welding joint of a 5 mm simulation workpiece



图5 5 mm 30CrMnSi 模拟件 X 射线探伤照片

Fig. 5 X-ray inspection photos of a 5 mm 30CrMnSi simulation workpiece

拉伸试样如图6所示,两个拉伸试样均断于热影响区。拉伸试验结果如表3所示。由表3可知,母材平均抗拉强度为1 227.5 MPa,接头平均抗拉强度为1 106 MPa,达到母材强度的90%;观察断口断面发现,断口断裂平齐,接头延展性较差,韧性相对较差。

接头硬度检验方式及硬度变化规律如图7所示。由图可知,接头硬度大于母材,接头无软化现象;此外,热影响区硬度远高于焊缝区及母材,其原因是过热区生成了晶粒粗大的马氏体组织。

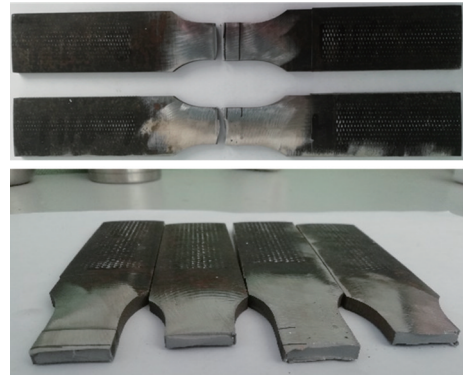


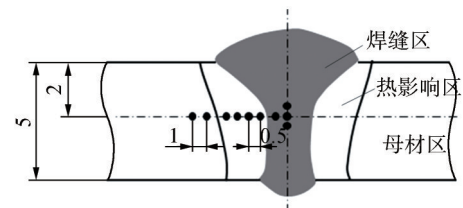
图6 接头拉伸断裂后试样

Fig. 6 Welding joints of after tensile testing

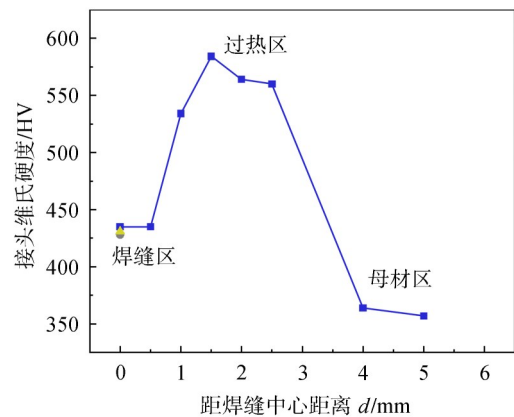
表3 拉伸试验结果

Fig. 3 Tensile test results

编号	编号	抗拉强度 R_m /MPa	断裂位置
接头	1	1 105	热影响区
	2	1 107	热影响区
母材	3	1 230	—
	4	1 225	—



(a) 接头硬度试验打点位置示意



(b) 接头不同位置硬度变化

图7 5 mm 模拟件焊接接头硬度检验结果

Fig. 7 Hardness testing results of the welded joint of a 5 mm simulation workpiece

2.4 接头金相组织检验

接头金相形貌分别如图8、图9所示。母材组织

为性能优异的回火索氏体,焊缝金相组织为贝氏体+马氏体,呈柱状晶;但过热区和正火区金相组织为晶粒粗大的马氏体+少量贝氏体,是导致热影响区硬度升高的主要原因;不完全正火区金相组织为回火索氏体+珠光体。对照接头拉伸性能(见表3),均断裂在热影响区,热影响区是一个相对比较复杂的区域,既有粗大的马氏体,又存在回火索氏体及珠光体组织,组织多样且分布不均,导致拉伸试样在热影响区位置断裂。

3 分析与讨论

焊接冷裂纹的产生主要与母材成分及厚度、拘束程度、淬硬组织以及扩散氢含量有关。激光-电弧复合焊接时,激光在前、电弧在后,激光首先照射到焊接试板,使激光光斑附近区域的试板局部温度升高,在一定程度上起到了提前预热的作用;同时,激光的加入也使周围区域的金属熔化,并与电弧共同

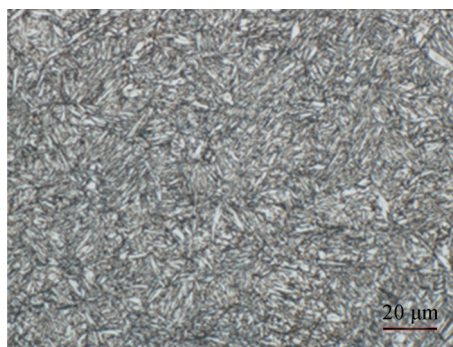


图8 母材金相形貌

Fig. 8 Microstructure of the base metal

作用,增加熔深、减小热输入,一定程度上减小了焊接的拘束应力,组织晶粒更为细小^[10]。

4 结论

(1)采用激光-电弧复合焊接方法可以实现厚5 mm的30CrMnSi单面焊双面成形,焊缝成形均匀美观,表面无咬边等缺陷。

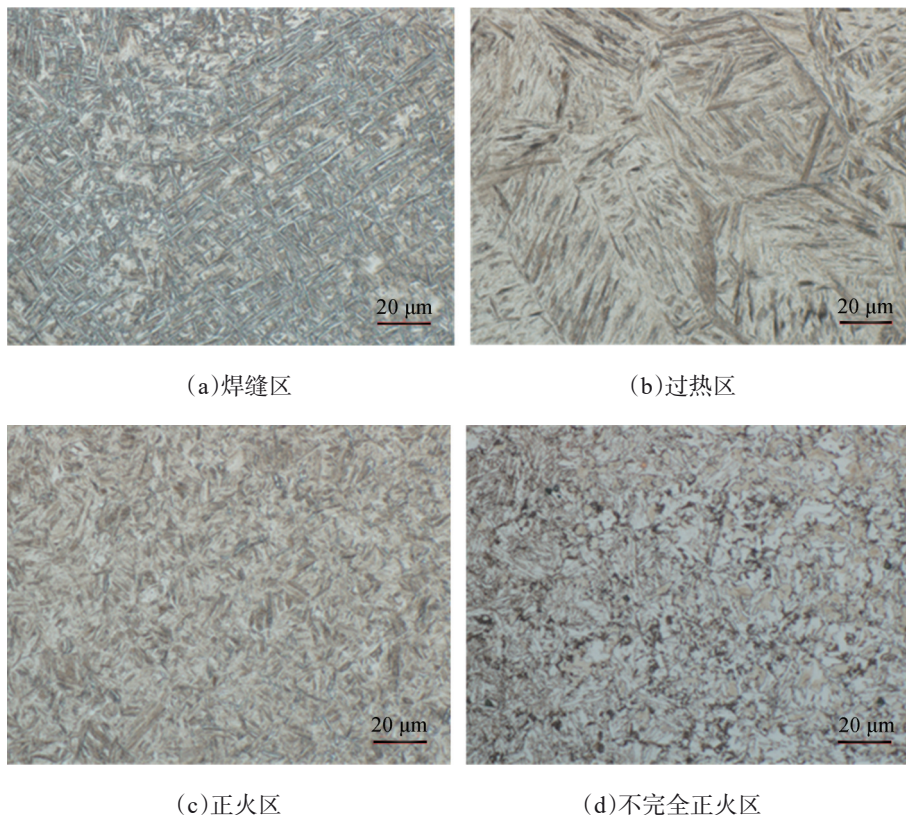


图9 接头金相形貌

Fig. 9 Microstructure of the joint

(2)在激光功率为3 000 W、焊接电流为90 A、钝边为3 mm的Y型坡口条件下,可有效避免5 mm厚30CrMnSi的焊接裂纹等缺陷的产生。

(3)焊接接头的平均抗拉强度为1 106 MPa以上,达到母材强度的90%,断裂位置为热影响区。

(4)较高的热输入导致接头过热区出现以粗大马氏体为主的金相组织,是导致热影响区硬度过高的主要原因。

参考文献:

- [1] 贾振东,王亚军,马瑞,等. A-TIG焊在高强钢30CrMnSiA焊接中的应用研究[A]. 中国航天第三专业信息网第三十七届技术交流会暨第一届空天动力联合会论文集[C]. 2016.
- [2] Baue A D, Boothby P J, Rothwell A B. Understanding the weldability of Nb-bearing HSLA steels[C]// AIME-TMS Interantional Symp. Niobium 2001, Orlando, USA, 2001:101-103.
- [3] 杨建国,黄鲁永,张勇,等. 30CrMnSi钢TIG焊冷裂纹形成机制[J]. 焊接学报, 2011, 32(12):13-16, 113.
YANG Jianguo, HUANG Luyong, ZHANG Yong, et al. Mechanism of cold welding cracks in 30CrMnSi steel joints welded by TIG method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(12):13-16, 113.
- [4] 杜昊龙,贺晓军. 某导弹30CrMnSi壳体TIG焊缝微裂纹分析[J]. 航空制造技术, 2012(13):111-114, 118.
DU Haolong, HE Xianjun. Micro-Crack Analysis on TIG Weld of Missile 30CrMnSi Shell[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(13):111-114, 118.
- [5] 雷华东,黄文荣,郭鹏,等. 调质状态下30CrMnSiA钢的激光焊接接头性能与组织[J]. 应用激光, 2003(06):322-326.
LEI Huadong, HUANG Wenrong, GUO Peng, et al. Study on Metallographic Structure and Property of Welded Joint for Laser Beam Welding of the Quenched and Tempered 30CrMnSiA [J]. Applied Laser, 2003(06):322-326
- [6] 雷华东,徐宾,殷俊. 30CrMnSiA调质钢的激光焊接性研究[J]. 激光技术, 2002(03):225-228, 236.
LEI Huadong, XU Bin, YIN Jun. Study on the weldability of the quenched and tempered 30CrMnSiA with laser beam welding[J]. Laser Technology, 2002(03):225-228, 236.
- [7] 石岩,刘佳,张宏,等. 30CrMnSi钢激光焊接工艺研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(07):991-997.
SHI Ya, LIU Jia, ZHANG Hong, et al. Research on Laser Welding of 30CrMnSi Steel [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(07):991-997.
- [8] 杨斯达. 30CrMnSiA钢激光-MAG复合焊接裂纹形成原因与抑制措施[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2012.
YANG Sida. Formation causes and suppression of cracking in laser-MAG hybrid welding of 30CrMnSi steel[D]. Harbin Institute of Technology, 2012.
- [9] 刘天亮,王贺,朱瑞灿,等. 30CrMnSiA厚板激光-GMA复合焊接特性研究[J]. 电加工与模具, 2019(03):59-63.
LIU Tianliang, WANG He, ZHU Ruican, et al. Research on Properties for 30CrMnSiA Thick Plate Machined by Laser-GMA Hybrid Welding [J]. Electromachining & Mould, 2019(03):59-63.
- [10] 滕彬,李小宇,雷振,等. 低合金高强钢激光-电弧复合热源冷裂纹敏感性分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(11):61-64.
TENG Bin, LI Xiaoyu, LEI Zhen, et al. Analysis on cold crack sensitivity of low alloy high strength steel weld by laser-arc hybrid welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(11):61-64.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>