基于爬壁机器人的EH36船用高强钢立焊工艺研究

曹立超[1]，刘晓光[1,2]，蒋晓明[1]，张浩[1]，王振民[2]

（1. 广东省智能制造研究所 广东省现代控制技术重点实验室，广州 510070；
2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院，广州 510641）

摘要：目的 研究在爬壁机器人平台上进行 EH36 船用高强钢立焊的可行性及工艺参数。**方法** 通过在实验室搭建焊接实验平台来模拟 EH36 船用高强钢的实际焊接场景；在轮式爬壁机器人 WRobot-50 平台上进行船用 EH36 高强钢的立焊实验；对不同参数下的试样进行宏观形貌、微观组织及相关力学性能分析。**结果** 在电流为 160 A、电压为 24.5 V、焊接速度为 0.6 m/min 下，可以得到外观成形及微观组织都没有缺陷的立焊焊缝，其中焊缝的硬度较母材提高了约 30%，屈服强度较母材约提高了 4.3%，抗拉强度较母材约提高了 9.0%。**结论** 爬壁机器人完全适用于船用 EH36 高强钢的立焊工艺，并且可以应用到船舶、石化等大型钢结构件的焊接工作中。

关键词：爬壁机器人；EH36 船用钢；立焊

DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2020.04.010

中图分类号：TG409 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-6457(2020)04-0094-06

Vertical Welding Technology of EH36 Marine High-strength Steel Based on Wall-climbing Robot

CAO Li-chao[1], *LIU Xiao-guang*[1,2], *JIANG Xiao-ming*[1], *ZHANG Hao*[1], *WANG Zhen-min*[2]

(1. Guangdong Key Laboratory of Modern Control Technology, Guangdong Institute of Intelligent Manufacturing, Guangzhou 510070, China; 2. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the feasibility and process parameters of vertical welding of EH36 marine high-strength steel on a climbing robot platform. This paper simulated the actual welding scenario of EH36 marine high-strength steel by building an experimental welding platform in the laboratory. The vertical welding experiment of marine EH36 high-strength steel was carried out on the WRobot-50 platform. Samples with different parameters were analyzed for macro morphology, microstructures and related mechanical properties. The experimental result showed that vertical weld without defect in terms of appearance and microstructure can be formed at 160 A, 24.5 V and 0.6 m/min. Compared with the base material, the hardness of the weld seam was increased by about 30%; the yield strength was increased by about 4.3%; and the tensile strength was increased by approximately 9.0%. The wall-climbing robot is completely suitable for the vertical welding process of marine EH36 high-strength steel, and can be applied to the welding of large steel structural parts such as ships and petrochemicals.

KEY WORDS: wall-climbing robot; EH36 marine steel; vertical welding

收稿日期：2020-05-28

基金项目：广东省科技计划（2020B090928002）；广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项（2017GDASCX-0115，2018GDASCX-0015）；广东省现代控制技术重点实验室开放运行项目（2017B030314165）

作者简介：曹立超（1990—），男，硕士生，主要研究方向为智能焊接装备技术。

通讯作者：刘晓光（1980—），男，硕士，副研究员，主要研究方向为智能焊接装备技术。

高强度的海洋工程用结构钢板具有良好的综合机械性能[1]、焊接性能和工艺性能[2]，适用于近海、深海采油平台、大型船舶、沿海发电厂、码头设施等结构件[3−6]。随着国内造船业的迅速发展，我国已成为世界最主要的造船大国之一[7−8]。高强钢的应用在节约钢材，减轻焊接结构自重方面起到了积极作用[9−13]。

目前在船体焊接组装过程中，主要通过人工焊接和铺设轨道的焊接小车来完成[14]，生产效率低，成本高，同时无法保证焊接质量的均匀性[15]。由于船体的外形尺寸比较大，船身绝大部分焊缝都是长直焊缝，需要一种特殊的焊接设备来完成[6]。磁吸附无轨爬壁机器人越来越广泛地应用于船舶的喷涂、探伤、检测、除锈等方面，但是采用无轨爬壁机器人进行自动化焊接的应用还很少。

为了提高船体等大型钢结构设备的焊接工作效率、降低焊接成本，文中在自主设计搭建的立焊实验平台上采用磁吸附爬壁机器人进行 EH36 船用钢板的焊接工艺研究，探究基于爬壁机器人焊接船用 EH36 钢板垂直立焊上的焊接工艺参数。

1　材料及焊接工艺方法

1.1　材料及参数

结合场地及设备的复杂性，本次实验用钢板为武汉钢铁公司生产的船用高强度钢板 EH36，板厚为 5 mm。主要化学成分及力学性能如表 1 所示，屈服强度≥395 MPa，抗拉强度≥520 MPa，伸长率≥21%，−40 ℃冲击功≥34 J。

表 1　船用 EH36 高强钢的主要化学成分（质量分数）

Tab.1 Main chemical compositions of marine EH36 high-strength steel (mass fraction)　　%

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
≤0.18	≤0.5	0.9~1.6	≤0.035	≤0.035	≤0.4	≤0.2	≤0.08	≤0.35

1.2　焊接工艺参数

由于本次实验用钢板为 5 mm 厚薄板，为了提高焊接质量和成形效果，采用熔化极气体保护焊，保护气为富氩混合气体（82% Ar+18% CO，体积分数）。使用国产 E711（Q）焊丝，焊丝直径为 1.2 mm。平板堆焊，本次实验的主要焊接工艺参数如表 2 所示。

表 2　焊接工艺参数

Tab.2 Process parameters of welding

序号	焊接速度/ $(mm \cdot s^{-1})$	送丝速度/ $(mm \cdot min^{-1})$	电压/ V	电流/ A	气流量/ $(L \cdot min^{-1})$	干伸长/ mm
1#	10	8	29.6	183	15	12
2#	10	7	24.5	160	15	12
3#	10	6	22.8	146	15	12
4#	6	7	24.6	159	15	12
5#	14	7	24.6	161	15	12

1.3　分析测试方法

首先采用放大倍数在 6~10 倍之间的蔡司 Stemi-305 型体视镜对焊缝正反面进行宏观成形形貌观察，然后采用 DK7735 型线切割机将材料加工成 10 mm×10 mm×5 mm 矩形试样，进行金相显微试验，经过研磨、抛光，以及用体积分数为 4%的硝酸酒精溶液腐蚀后，采用蔡司 Axioskop40 型光学显微镜对试样进行显微组织观察。

采用 MH-3 型显微硬度计进行硬度检测，选取的加载力为 300 g，保压时间为 12 s，相邻两个测量点之间的距离为 0.5 mm。在 CMT-5150 型万能力学试验机上进行样品的拉伸试验。

2　实验

2.1　设备

实验采用广东省智能制造研究所自主研发的 WRobot-50 型磁吸附爬壁机器人，其结构紧凑简单，能够利用磁轮的结构特点，实现平面、曲面、大型钢体等各种复杂导磁面的爬行和转向，利用操作机构的中铝合金型材的连接实现各类作业模块的有效组合，准确高效地完成焊接、探伤、除锈、清洗等作业任务。该爬壁机器人的型号为 WRobot-50，本体质量为 52 kg，负载能力为 110 kg，最小爬行的曲面直径为 D>0.35 m，爬壁角度为 0~180°，行走能力为 0~20 m/min 速度可调，曲面上稳定行走，可自由转向，可跨越宽度为 50 mm，高度为 15 mm 的焊缝，工作高度为 50 m，工作温度范围为−10~40 ℃，可以搭载焊接、清洗、喷涂、检测、打磨等作业平台。

2.2　焊接实验平台搭建

为了模拟实际的大构建焊接场景，在实验室搭建如图 1 所示的焊接实验平台，同时考虑到实验的可重复性，在焊接平台上开出了几种不同的“ 窗口 ”，方便更换实验板。焊机型号为乐驰 S8，最大焊接电流可达 400 A，满足本次实验 5 mm 薄板的焊接需求。

采用爬壁机器人在试验平台上进行 EH36 船用钢立焊工艺研究，采用下行焊，焊枪夹角及焊接方向如图 2 所示。

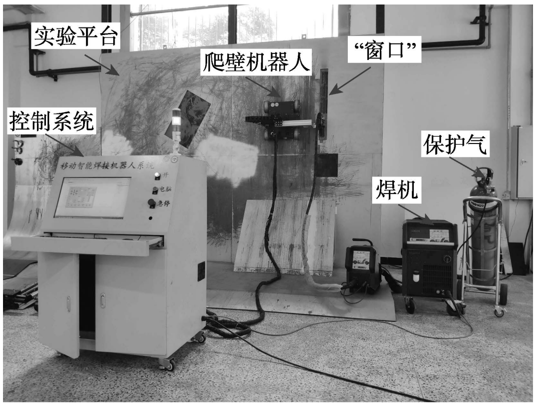


图 1 焊接实验平台
Fig.1 Experiment platform of welding

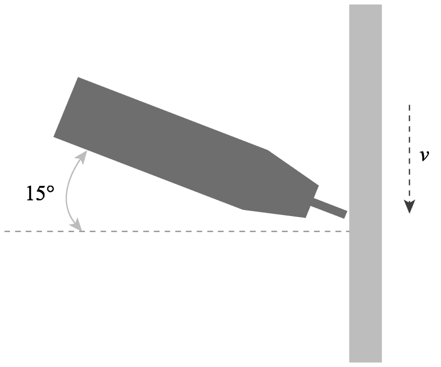


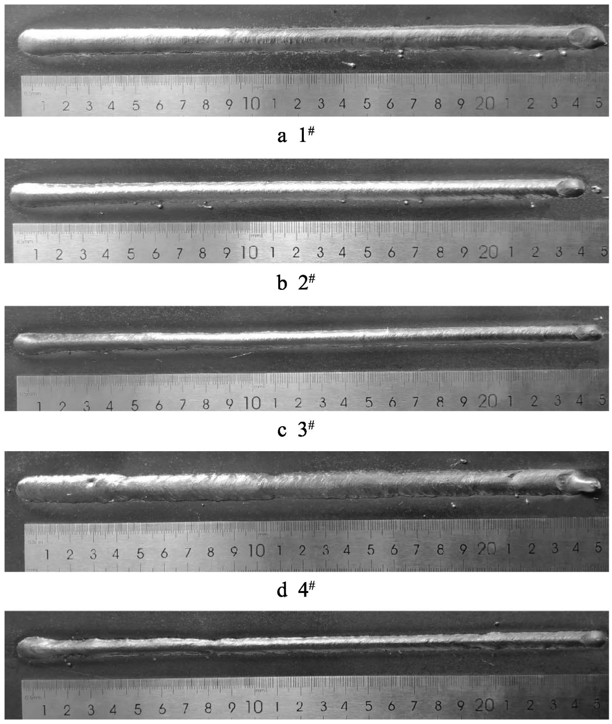
图 2 焊枪角度及焊接方向示意图
Fig.2 Schematic diagram of welding torch angle and welding direction

3 结果及分析

分别对焊缝的宏观形貌、微观组织、硬度和拉伸性能进行观测和测量。

3.1 焊缝宏观形貌

从图 3 中 1#—3#焊缝可以看出，随着焊接电流的减少，焊缝宽度越来越小，其中 1#和 2#焊缝有少量飞溅，3#焊缝由于焊接电流最小，几乎没有任何飞溅产生，但是 1#和 3#焊缝的焊缝宽度不是很均匀，有部分位置出现了变窄或变宽的现象，2#焊缝整体很均匀，几乎没有明显的宽度变化现象。

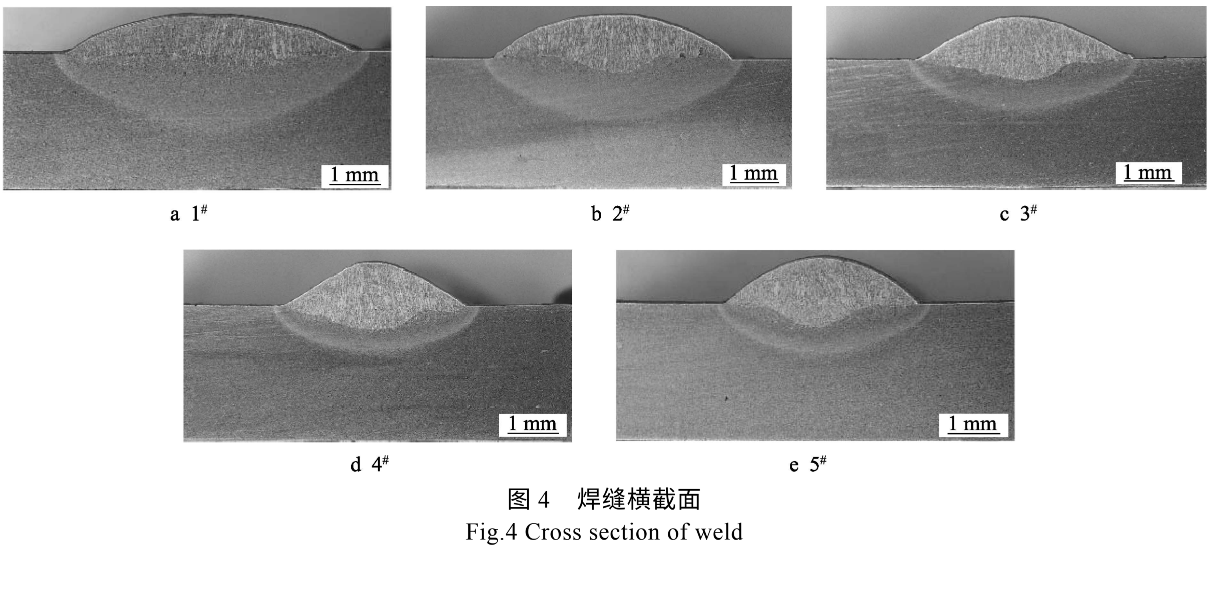


a 1#
b 2#
c 3#
d 4#
e 5#

图 3 焊缝宏观形貌
Fig.3 Macro appearance of weld

对比图 3 中 2#，4#，5#焊缝可以看出，当焊接速度减小（4#焊缝）时，焊缝宽度变大，焊缝宽度方向上整体变得很不均匀，外观上出现了很多缺陷；当焊接速度增加（5#焊缝）时，焊缝宽度变小，同样在焊缝宽度方向上出现了不均匀的现象。

为了进一步对焊缝成形的最佳参数进行确定，对焊缝的横截面进行了测量，得到图 4 所示的焊缝截面。



a 1#
b 2#
c 3#
d 4#
e 5#

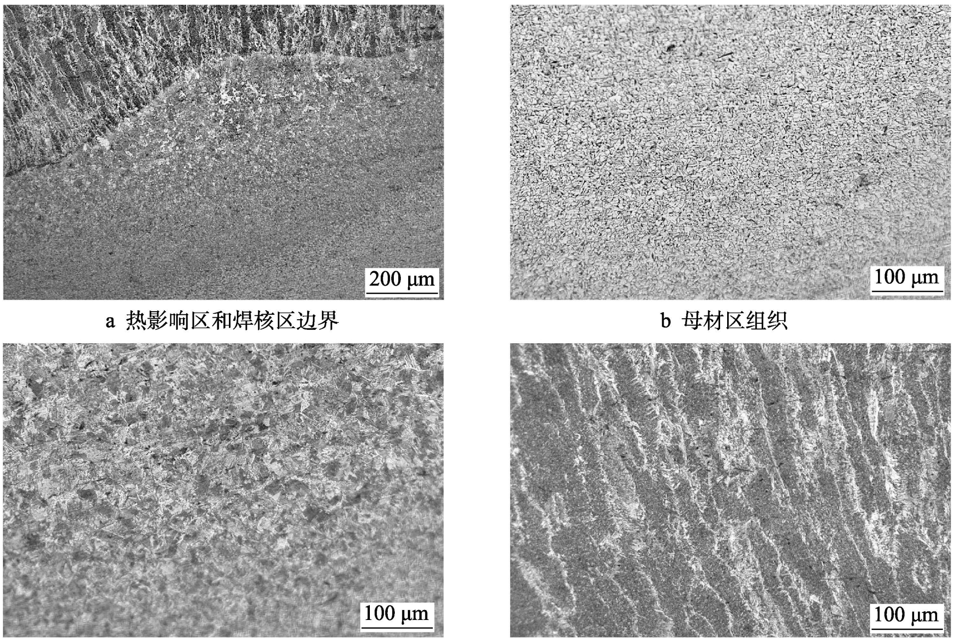
图 4 焊缝横截面
Fig.4 Cross section of weld

对比 1#—3#焊缝，随着焊接电流的减小，焊缝的深宽比越来越大，每一组焊缝均未产生缺陷；对比 4#，2#，5#焊缝，随着焊接速度的增加，焊缝的深宽比越来越大，其中 4#焊缝中出现了缩孔缺陷。对比以上 5 组焊缝可以看出，2#焊缝的深宽比适合，焊缝外观成形良好，焊缝中也没有出现气孔缩松等缺陷，是本体立焊工艺中试验的最佳工艺参数。

3.2　焊缝微观组织

对 2#焊缝进行微观组织观察，分别观测焊核区、热影响区以及母材区的组织。

从图 5a 可以看到母材区、热影响区和焊核区界限明显，图 5b 为母材区组织，以细小的等轴晶为主，图 5c 为热影响区组织，以粗大的粗晶奥氏体为主，热影响区由于受到 MIG 焊急热急冷的热循环作用，使得热影响区的粗晶区晶粒急剧长大，粗大的晶粒硬且脆。图 5d 为焊核区组织，以长条状的柱状晶为主。焊核区中的晶粒在熔合区附近被加热到半熔化状态，附着在基体金属表面形核，以柱状晶形态不断向焊核中心生长，最终长成为长条状的粗大柱状晶。



a 热影响区和焊核区边界　　b 母材区组织

c 热影响区组织　　d 焊核区组织

图 5　焊缝微观组织

Fig.5 Microstructures of weld

3.3　焊接接头的硬度

接头试样的显微硬度取样位置如图 6 所示。材料不同区域的显微硬度值分布如图 7 所示。

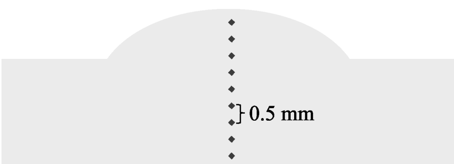


图 6　焊缝取样位置示意图

Fig.6 Schematic diagram of weld sampling position

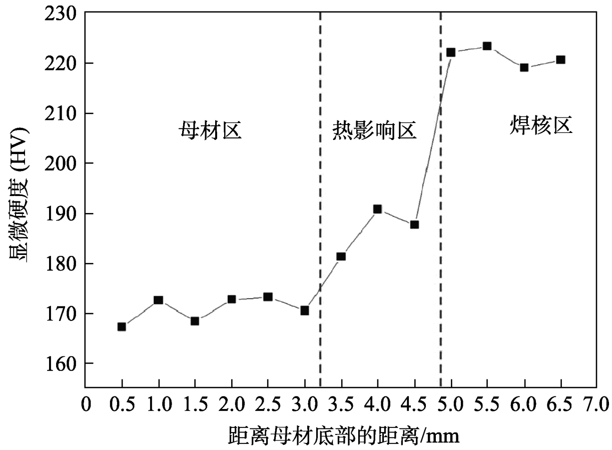


图 7　显微硬度值分布

Fig.7 Distribution of microhardness

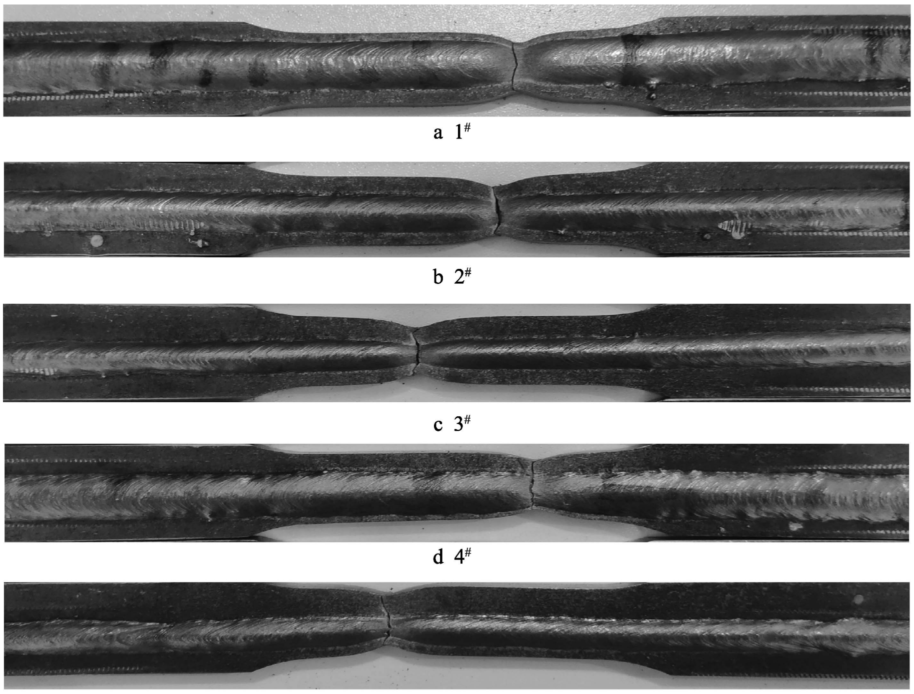
母材区的硬度值较低，平均硬度值在 HV170 左右，说明高强钢基体金属的强度和韧性都比较高，力学性能优良；热影响区的硬度略高于母材区，平均硬度值在 HV185 左右，分析是因为热影响区由粗大的粗晶奥氏体组成，导致显微硬度略有升高。

焊核区的硬度最高，平均硬度值达到了 HV220 左右，由于焊核区的晶粒长成了粗大的长条状柱状晶，导致焊核区的硬度显著升高。

3.4　焊接接头的拉伸性能

拉伸试样的取样位置为沿着焊缝的方向，对拉伸试样进行拉伸试验，拉伸完成后试样断裂位置如图 8

所示。可以看到，由于采用平板堆焊的方式进行焊接试验，所有拉伸试样的断裂位置均分布在试样的中部，且断裂位置不一致。结合图 3 中焊缝横截面可以看到，平板堆焊的堆焊层很浅，所以拉伸试样的拉伸性能主要以母材的性能为主，所以所有的焊缝断裂位置均集中在中部。



a 1# b 2# c 3# d 4# e 5#

图 8 拉伸试样断裂位置

Fig.8 Fracture position of the tensile specimen

所有拉伸试样拉伸过程中测得的屈服强度和抗拉强度见表 3，屈服强度的平均值为 412 MPa，母材屈服强度为 395 MPa，抗拉强度的平均值为 567 MPa，母材抗拉强度为 520 MPa。

表 3 不同焊缝抗拉强度和屈服强度值

Tab.3 Tensile strength and yield strength of different welds MPa

序号	屈服强度	抗拉强度
1#	421	575
2#	421	572
3#	420	564
4#	416	577
5#	390	549

从表 3 可以看到，经过堆焊后 5 组焊缝之间的屈服强度和抗拉强度和母材比较差别不大，也说明了由于堆焊层较浅，性能以母材为主，其中屈服强度较母材约提高了 4.3%，抗拉强度较母材约提高了 9.0%，说明经过堆焊后，堆焊层可以增加组织的屈服强度，而抗拉强度不会降低。

4 结论

通过自主设计搭建的实验平台以及爬壁机器人进行了 EH36 船用钢竖直立焊的工艺研究，通过对焊缝的宏观形貌、微观组织、硬度和拉伸性能进行分析，得到以下结论：在电流为 160 A、电压为 24.5 V、焊接速度为 0.6 m/min 条件下，焊接 5 mm 厚 EH36 船用钢，可以得到外观成形较好、内部没有任何缺陷的立焊焊缝；通过对试样的硬度和拉伸性能进行分析，证明爬壁机器人完全适用于船用 EH36 钢的竖直立焊，并且可以应用到船舶、石化等大型钢结构件的焊接工作中。

参考文献：

[1] ZHANG Y M, PAN C, MALE A T. Welding of Austenitic Stainless Steel Using Double Sided Arc Welding Process[J]. Materials Science and Technology, 2001(10): 1280—1284.

[2] AGILAN M, VENKATESWARAN T, SIVAKUMAR D, et al. Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of Inconel-718EB Welds[J]. Procedia Materials Science, 2014, 5: 656—662.

[3] MORITA T, YAMANAKA M. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al-Mg-Si Joint[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 595(3): 196—204.

[4] 马金军, 王超, 吴磊磊, 等. EH36 船板钢大热输入焊

接接头粗晶区组织及性能分析[J]. 船舶与海洋工程, 2016(6): 27—29.
MA Jin-jun, WANG Chao, WU Lei-lei, et al. Microstructure and Performance Analysis of the Large Heat Input Welded Joint of EH36 Ship Plate Steel[J]. Ship and Ocean Engineering, 2016(6): 27—29.
[5] 王博. EH36 船用高强度钢焊接工艺研究[J]. 船舶职业教育, 2017, 5(1): 57—61.
WANG Bo. Research on Welding Technology of EH36 Marine High-strength Steel[J]. Marine Vocational Education, 2017, 5(1): 57—61.
[6] 李景波, 王刚, 沙玉章, 等. 船体厚板高效气电立焊焊接技术的研究[J]. 电焊机, 2004, 34(2): 14—16.
LI Jing-bo, WANG Gang, SHA Yu-zhang, et al. Research on Welding Technology of High-efficiency Gas-electric Vertical Welding of Thick Plates of Ship Hull[J]. Electric Welding Machine, 2004, 34(2): 14—16.
[7] 吕冬, 瞿晓, 韩鹏, 等. 新型 EH36 钢高强船板钢的气电立焊试验研究[J]. 焊接, 2007(5): 91—93.
LYU Dong, QU Xiao, HAN Peng, et al. Experimental Research on Gas-electric Vertical Welding of New Type EH36 Steel High-strength Ship Plate Steel[J]. Welding, 2007(5): 91—93.
[8] 赵洁, 徐得志, 涂永彬. 高强度船体结构用钢 EH36 超厚板焊接工艺研究[J]. 航海工程, 2014, 43(3): 44—47.
ZHAO Jie, XU De-zhi, TU Yong-bin. Research on Welding Technology of High-strength Steel EH36 Ultra-thick Plate for Hull Structure[J]. Navigation Engineering, 2014, 43(3): 44—47.
[9] 檀财旺. EH36 钢厚板双面双弧立焊焊接特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 6—15.
TAN Cai-wang. Research on Welding Characteristics of Double-sided Double-arc Vertical Welding of EH36 Steel Plate[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 6—15.
[10] 刘欣宁, 李成思. E36 船用高强钢厚板焊接试验及工艺研究[J]. 焊接技术, 2018, 47(10): 37—39.
LIU Xin-ning, LI Cheng-si. E36 Marine High-strength Steel Plate Welding Test and Process Research[J]. Welding Technology, 2018, 47(10): 37—39.
[11] 易耀勇, 王凯, 江泽新, 等. 大线能量焊接用 EH36 钢的 FCB 焊接接头组织与性能[J]. 焊接技术, 2016, 45(5): 99—103.
YI Yao-yong, WANG Kai, JIANG Ze-xin, et al. Microstructure and Properties of FCB Welded Joints of EH36 Steel for Large Line Energy Welding[J]. Welding Technology, 2016, 45(5): 99—103.
[12] 张雪亚, 韩毅华, 李少英, 等. 大线能量焊接船板钢焊缝冲击断裂机理[J]. 热加工工艺, 2018, 47(15): 165—167.
ZHANG Xue-ya, HAN Yi-hua, LI Shao-ying, et al. Impact Fracture Mechanism of Large Line Energy Welding Ship Plate Steel Weld Seam[J]. Hot Processing Technology, 2018, 47(15): 165—167.
[13] 安海玉, 郝鑫, 尹绍江, 等. 高强度船板钢 EH36 的开发[J]. 宽厚板, 2018, 24(3): 8—10.
AN Hai-yu, HAO Xin, YIN Shao-jiang, et al. Development of High-strength Ship Plate Steel EH36[J]. Wide and Heavy Plate, 2018, 24(3): 8—10.
[14] 林华益, 黄成强. HCDHCD500-6 型全位置焊接小车 FCAW 平焊工艺及应用探索[J]. 机电技术, 2018(4): 48—51.
LIN Hua-yi, HUANG Cheng-qiang. FCAW Flat Welding Process and Application of HCDHCD500-6 All-position Welding Trolley[J]. Electromechanical Technology, 2018(4): 48—51.
[15] 张立新, 纪文刚, 李铁香. 管道自动焊接小车行走控制的研究[J]. 焊接技术, 2016, 44(12): 69—70.
ZHANG Li-xin, JI Wen-gang, LI Tie-xiang. Research on the Walking Control of the Pipeline Automatic Welding Trolley[J]. Welding Technology, 2016, 44(12): 69—70.