

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.09.15

海洋工程克令吊基座焊接工艺及 现场施工技术研究

伊松¹, 马兴原²

1. 博迈科海洋工程股份有限公司, 天津 300457

2. 天津博迈科海洋工程股份有限公司, 天津 300457

摘要: 克令吊基座作为海工平台关键承载结构, 具有母材强度高、板厚大、结构刚性强等特点, 在焊接过程中易产生冷裂纹、热裂纹及焊接变形等质量问题。针对某项目中尺寸为2001 mm×2169 mm×19135 mm、净重达45.945 t的EH36高强度钢基座结构, 本研究开发了药芯焊丝配合陶瓷衬垫的单面焊双面成形(SSW-DSF)工艺, 并结合现场施工控制技术, 有效解决了传统背面清根效率低、劳动强度大等问题。通过控制层间温度($\leq 230^{\circ}\text{C}$)、控制热输入($\leq 13\text{ kJ/cm}$)、限制打底焊电流($\leq 200\text{ A}$)以及实施多层多道焊, 显著降低了接头冷/热裂倾向并减小了焊接变形。试验结果表明: 接头力学性能满足设计要求, 无损检测合格率高。实际应用验证该工艺可有效保障克令吊基座的焊接质量与安装精度, 为同类厚板高强度钢结构焊接提供技术参考。

关键词: 克令吊基座; EH36高强度钢; 药芯焊丝; 陶瓷衬垫; 焊接工艺

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)09-0145-05

Research on Welding Technology and Field Construction Techniques for Offshore Crane Pedestal Foundations

YI Song¹, MA Xingyuan²

1. Bomesc Offshore Engineering Co., Ltd., Tianjin 300457, China

2. Tianjin Bomesc Offshore Engineering Co., Ltd., Tianjin 300457, China

Abstract: Crane pedestal foundations in offshore engineering are characterized by high-strength base materials, thick-section plates, and highly rigid structures, making them susceptible to cold/hot cracking and structural distortion during welding. For a specific project involving an EH36 high-strength steel pedestal (dimensions: 2001 mm × 2169 mm × 19135 mm, weight: 45.945 t, plate thickness: 42 mm), this study developed a flux-cored arc welding (FCAW) process using ceramic backing for single-side welding with double-sided formation (SSW-DSF). This approach eliminates the need for back gouging, improves welding efficiency, and reduces secondary heat-induced deformation. Key process parameters: interpass temperature control ($\leq 230^{\circ}\text{C}$), maximum heat input ($\leq 13\text{ kJ/cm}$), and root pass current limitation ($\leq 200\text{ A}$)—were optimized to mitigate cracking risks and ensure joint integrity. Multi-pass welding strategies were employed to minimize residual stresses and angular distortions. The welded joints passed all non-destructive testing (VT, MT, UT) and mechanical tests (tensile, bend, impact, hardness), meeting project specifications. Practical implementation confirmed that the proposed technology ensures both weld quality and dimensional accuracy of the crane pedestal. This work provides valuable technical guidance for similar thick-plate, high-strength steel welding applications in offshore structures.

Keywords: crane pedestal foundation; EH36 high-strength steel; flux-cored wire; ceramic backing; welding technology

引用格式: 伊松, 马兴原. 海洋工程克令吊基座焊接工艺及现场施工技术研究[J]. 电焊机, 2025, 55(9): 145–149.

Citation: YI Song, MA Xingyuan. Research on Welding Technology and Field Construction Techniques for Offshore Crane Pedestal Foundations[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(9): 145–149.

收稿日期: 2025-05-26 修回日期: 2025-08-29

作者简介: 伊松(1986—), 男, 学士, 工程师, 主要从事海洋工程焊接工艺技术研究。E-mail: yisong@bomesc.com。

0 引言

克令吊基座作为承载克令吊重量和作业负荷的关键结构部件,其焊接质量直接关系到海工平台装卸作业的安全性和可靠性。某项目克令吊基座的主体结构尺寸为2001 mm(长)×2169 mm(宽)×19 135 mm(高),净重45.945 t,基座外板板厚达到42 mm,材质采用EH36高强度钢。同时由于基座属于大板厚的封闭型刚性结构,焊接过程中焊接接头部位承受较大的拘束应力,容易出现焊接冷裂纹缺陷。传统的基座焊接工艺采用药芯焊丝+背面气刨清根工艺,生产效率低、劳动强度大并且焊接质量不易保证。为了提高焊接施工效率,采用药芯焊丝在陶瓷衬垫上的单面焊双面成形工艺,可强制焊缝背面成形,同时减少因二次受热造成的变形问题。但陶瓷衬垫打底焊道上易于出现热裂纹缺陷。同时基座选用的母材为EH36高强钢,属于TMCP型控冷控轧钢,当焊接热输入超过正常范围时,会产生焊接热影响区的软化和脆化问题。

基于以上三个方面的施工难点,本研究开展了克令吊基座高效焊接工艺的开发和现场施工技术的研究,开发了药芯焊丝+陶瓷衬垫单面焊双面成形的焊接工艺,并且通过优化焊接工艺参数,控制打底焊道的热裂纹缺陷,通过多层多道焊减少了结构的焊接变形,保证结构的焊接质量。

1 焊接工艺开发

1.1 基座母材EH36钢的化学成分及力学性能

克令吊基座的材质为42 mm厚的EH36级高强度钢,以控冷控轧状态供货,母材碳当量为0.33%, P_{cm} 值为0.18%,材料可焊性优良。裂纹敏感系数 P_{cm} 是表征金属在焊接过程中产生裂纹倾向的关键指标,根据裂纹类型可分为热裂纹和冷裂纹。 P_{cm} 值与冷裂纹呈正相关, P_{cm} 值越高,钢材焊接时产生冷裂纹的敏感性越强、风险越大;反之, P_{cm} 值越低,冷裂纹风险越小。但由于板厚较大,结构刚性高,焊后冷却速度较快,因此焊接接头存在较高的冷裂纹风险^[1-3]。母材的化学成分和力学性能分别如表1、表2所示。

表1 EH36钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of EH36 steel (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Cr	Ni
0.10	0.30	1.31	0.011	0.001	0.02	0.017	0.04	0.02

表2 EH36钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of EH36 steel

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	-40℃冲击吸收能量/J
495	590	26	280,305,310

1.2 焊接材料选型

药芯焊丝选用与母材同级别的Supercored 71H,直径1.2 mm,属于AWS A5.20 E71T-1CJ级别。为了降低焊接接头的冷裂倾向,要求焊丝的扩散氢含量≤5 mL/100 g。药芯焊丝熔敷金属的化学成分与力学性能分别见表3、表4。陶瓷衬垫使用JN系列焊接衬垫,其耐火度>1 300℃,吸潮率≤0.35%。

表3 药芯焊丝熔敷金属的化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical composition of deposited metal of flux-cored wire

C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cr	Cu
0.03	0.31	1.28	0.015	0.005	0.45	0.004	0.02	0.01

表4 药芯焊丝熔敷金属的力学性能

Table 4 Mechanical properties of deposited metal of flux-cored wire

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	-40℃冲击吸收能量/J
470	560	27	140,150,128

1.3 焊接工艺试验

1.3.1 焊件坡口准备

根据施工现场的坡口形式和焊接位置,选取2G位置进行焊接,具体的坡口形式如图1所示。

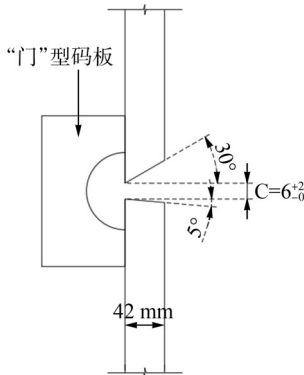


图1 焊接坡口形式

Fig. 1 Welding groove form

1.3.2 预热温度确定

为确定焊接预热温度,采用日本JIS标准推荐的预热温度计算公式^[4-5]:

$$T=144P_{cm}+0.36t+20$$

式中 P_{cm} 为裂纹敏感系数。估算预热温度应为 80 ℃, 考虑到结构刚性大、板厚条件将预热温度设定为 120 ℃。

1.3.3 焊接工艺参数控制

应根据焊接质量和焊接效率的要求设计焊接工艺参数。为了保证焊接接头的低温韧性要求, 需控制最大层间温度为 230 ℃。考虑到药芯焊丝焊缝低温韧性要求以及横焊位置的特点, 控制最大热输入为 13 kJ/cm。焊接线能量与焊缝金属韧性和抗裂性呈负相关, 与生产效率呈正相关: 线能量增大时, 焊缝金属韧性及抗裂性通常下降, 但生产效率提高; 线能量减小时, 焊缝金属韧性及抗裂性提升, 但生产效率降低, 选择时需在二者之间权衡。对于直径 1.2 mm 的药芯焊丝来说, 当 $I=260\text{ A}$, $U=30\text{ V}$, $V=36\text{ cm/min}$, 即线能量 $Q=60UI/V=13\text{ kJ/cm}$ 时, 这时的焊缝金属韧性处于高值范围, 同时焊接热影响区晶粒保持细化, 也居于高韧性。因此将 13 kJ/cm 选为韧性、抗裂性和生产效率之间的平衡点。

在药芯焊丝陶瓷衬垫焊接工艺中, 打底焊道易出现焊接热裂纹, 且当焊接电流增大时出现热裂纹的概率增大。这是由于随着电流的增大, 电弧对母材及衬垫的热作用增加, 在熔池中引入了更多的氧化物, 降低了焊缝的纯净度, 同时由于热量增大及陶瓷衬垫的保温作用, 延长了低熔点共晶的存在时间, 增加了焊缝热裂纹的倾向。因此, 需要控制打底焊的电流不超过 200 A^[6-8]。具体的焊接工艺参数如表 5 所示。

表 5 药芯焊丝陶瓷衬垫气保护焊工艺参数

Table 5 Process parameters for gas shielded welding with ceramic backing and flux-cored wire			
焊道	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(cm·min ⁻¹)
打底	190~200	23~24	23~24
填充、盖面	180~220	23~27	24~31

2.3.4 焊接工艺试验结果

(1) 无损检测。

焊后 24 h 对试板进行目检 (VT)、磁粉检测 (MT)、超声波检测 (UT), 试板的外观和无损检测结果符合项目设计要求。

(2) 拉伸试验。

试板横向拉伸的抗拉强度大于 490 MPa, 与母材同级别, 符合项目设计要求, 如表 6 所示。

表 6 拉伸试验结果

Table 6 Tensile test results			
项目	抗拉强度/MPa	断口位置	结果
横向拉伸试样 1	530	焊缝	合格
横向拉伸试样 2	535	焊缝	合格

(3) 弯曲试验

将试样弯曲到 180°, 弯曲试样表面任何方向上缺陷不得超过 3 mm, 试验结果表明: 弯曲试样表面无任何可见裂纹, 试样合格。

(4) 冲击试验

冲击试验共取冲击试样 4 组, 每组 3 个试样, 并按不同的试验温度和位置要求分别进行试验, 试验数据见表 7。试验结果符合项目设计要求。

表 7 冲击试验数据

Table 7 Impact test results				
缺口位置	试验温度/℃	冲击吸收能量/J	平均值/J	结果
焊缝中心	-40	164、147、155	155	合格
熔合线	-40	168、140、217	175	合格
熔合线+2 mm	-40	245、253、251	250	合格
熔合线+5 mm	-40	242、248、263	251	合格

(5) 硬度试验。硬度测试结果不超过 350 HV, 符合项目设计要求。

2 焊接现场施工要点

2.1 焊前准备

定位焊缝的质量好坏直接影响到整个焊接接头的焊接质量。由于定位焊缝较短, 加快了冷却速度, 易出现淬硬马氏体组织, 而引起细小裂纹, 留在结构中会造成隐患。克令吊基座横向对接焊缝定位焊不直接定位在焊缝中, 而采用马板定位在坡口反面钢板上。装配定位焊采用 E5015 焊条, 定位焊长度应大于 50 mm, 如定位焊质量不好而开裂, 结构容易产生错位等变形, 降低结构焊接质量。定位焊时采用燃气火焰进行局部加热, 比相应板厚预热温度略高 20 ℃ 左右, 来保证定位焊缝质量^[9]。结构焊接之前要求清除焊接接头两侧约 20 mm 范围内: 氧化铁渣、铁锈水汽、油污和杂物等, 以减少焊接时氢的来源, 降低氢致裂纹倾向。

检查气体流量情况,管道 CO_2 气体,其纯度保证在99.7%以上,气体流量可增大到20~25 L/min,当风速大于2 m/s时,应做好防风措施。

在粘贴陶质衬垫前先将坡口反面两边10 mm范围内清洁干净,以免影响衬垫的粘合力。衬垫要求干燥,粘贴时中心线对准,保持平直、紧贴。

2.2 焊接过程控制

结构中同时存在对接和角接缝,应先焊对接缝,后焊角接缝。因为正确的焊接程序对减少结构焊接变形,降低残余应力并使其分布合理,提高结构的焊接质量等均有重要意义。

克令吊基座为四方体形状,焊接接头主要是四边为横向对接接头焊缝和四个角的角接头立角焊缝,所以先焊四个边的横向对接焊缝,再焊四个角的角焊缝,如图2所示。角焊时采用由下向上的上行焊,多层多道焊,控制层间温度不低于100℃、焊道宽度不大于16 mm等措施。

为了减少焊接变形,确保结构安装数据的精确,4名焊工同时施焊,一人一面,采用分中退焊法,相同的焊接顺序;相同的焊接规范和焊接方向,以获得基本相同的收缩变形。另外,为保证克令吊基座中心线垂直度的精确尺寸,防止倾斜变形,焊接过程中不断监测焊接变形,及时调整焊接顺序。如果基座向右略微倾斜时,那么先焊左边焊缝,尽量让其自由收缩变形,产生反偏差效果。反之则相反,灵活应用。以达到标准范围内为止。这将有利于克令吊的安装和使用性能。

由于克令吊基座板较厚为42 mm,横向缝陶质

衬垫 CO_2 焊单面焊时必须采用多层多道焊,不得用单道阔焊缝焊法,否则极易造成热输入量过大,晶粒长大现象,影响接头的韧性。严格控制层间温度。长焊缝焊接时要保持整条接头的多层多道焊,不能局部一次焊完。打底焊时,每层焊道焊完后清除焊渣、飞溅,并锤击焊道消除应力。

由于板厚且坡口较深,打底焊时,喷嘴应使用厚板焊接专用的细长导电嘴、喷嘴^[10],但是细长喷嘴容易被飞溅堵塞,产生气孔、短路等问题,焊接时需要采用合理的电流电压匹配,使电弧稳定减少飞溅,需经常清理喷嘴上的飞溅,另外也可以使用防飞溅的专用高硅油,效果很好。

横向缝焊接时引弧应在引弧板或坡口内,角焊焊道范围内进行。严禁在坡口以外的钢板上随意引弧,否则极易由于冷却过快而出现微小裂纹等缺陷,这种缺陷留在结构上可能会发展成大裂纹而造成事故。

焊丝直径为1.2 mm药芯焊丝,打底焊电流不大于200 A,打底层焊缝应一次连续焊完。在成型打底焊后应连续完成第二层的填充焊。

盖面焊时由于板厚较厚,焊缝较宽,盖面同样采用多道焊;注意叠盖平整,道与道之间过渡和顺,通过控制电弧电压和焊接速度,使整条焊缝平直漂亮。

2.3 焊后检测与处理

克令吊基座横向焊缝和角焊缝焊后48 h进行超声波探伤和磁粉探伤来检查焊缝内部及焊缝近表面的缺陷。发现缺陷存在时,需要修补处理:先清除焊缝中的夹渣、气孔、裂纹等缺陷,并打磨干净,用磁粉探伤确认清除了缺陷。然后采用燃气火焰局部预热,范围为修补处两端各延伸70~100 mm,温度略高于预热温度20℃左右,再按正常的焊接规范施焊修补,多层多道焊,清渣,控制层间温度,修补处焊道长度大于50 mm以上,焊后打磨光滑。须经超声波,磁粉探伤检查合格为止。

由于对克令吊基座大合拢焊接施工的质量高度认识,同时施工前制定了较完善的施工工艺,在操作中严格按照规范工艺要求施焊,经检验,克令吊基座大合拢安装精度符合技术要求,超声波探伤和磁粉探伤合格率达标。

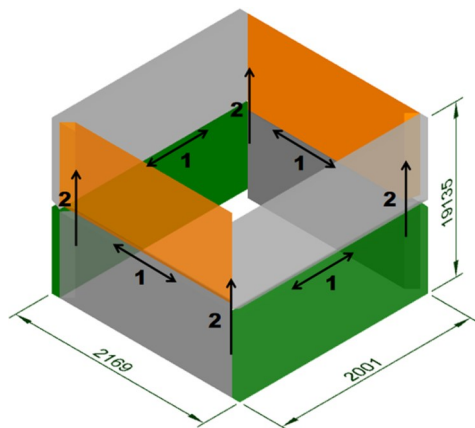


图2 焊接顺序

Fig. 2 Welding sequence

3 结论

(1)本研究开发的药芯焊丝+陶瓷衬垫单面焊双面成形工艺,成功替代传统清根工艺,显著提升了焊接效率,降低了劳动强度,适用于海洋工程厚板高强度钢结构。

(2)关键工艺参数包括:预热温度120℃、最大热输入13 kJ/cm、层间温度 ≤ 230 ℃、打底焊电流 ≤ 200 A,有效抑制了冷裂与热裂倾向,保障了接头低温韧性。

(3)现场施工中通过“对称同步焊接+动态变形调控+多层多道焊”组合措施,有效控制了结构变形,确保了基座安装精度。

(4)整套焊接工艺经试验验证和工程实践检验,完全满足项目技术要求,具备推广价值。今后克令吊基座焊接可以朝着机器人自动化焊接方向发展,需要解决药芯焊丝的多层多道焊控制问题,这对于进一步提高焊接效率和焊缝质量水平具有重要意义。

参考文献:

- [1] 吕志军,闵祥军,田雷,等.调质钢API2Y Gr60埋弧焊工艺[J].焊接技术,2021,50(11):54-57.
LV Z J, MIN X J, TIAN L, et al. SAW welding procedure of API 2Y Gr60 quench and temper steel[J]. Welding Technology, 2021, 50(11): 54-57.
- [2] 周振丰.焊接冶金学(金属焊接性)[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [3] 李亚江.高强钢的焊接[M].北京:冶金工业出版社,2010.
- [4] 周敏惠.焊接缺陷与对策[M].上海:上海科学技术文献出版社,1984.
- [5] 陈伯鑫.焊接工程缺欠分析与对策[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [6] 任军,陈晨,余应堂.CO₂气体保护药芯焊丝送丝性能评价及其研究[J].金属加工(热加工),2022(3):57-61.
REN J, CHEN C, SHE Y T. Evaluation and research on wire feeding performance of CO₂ gas shielded flux-cored welding wire[J]. MW Metal Forming, 2022(3): 57-61.
- [7] 张智,陈邦固,金立鸿,等.药芯焊丝在船舶焊接中的缺欠与对策[J].电焊机,2007(6):86-91.
ZHANG Z, CHEN B G, JIN L H, et al. Defect and solution in flux-cored wire used in ship welding[J]. Electric Welding Machine, 2007(6): 86-91.
- [8] 桂赤斌.高强度钢船体焊接接头的韧性与韧化[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [9] 尹士科.低合金钢焊接特性及焊接材料[M].北京:化学工业出版社,2014.
- [10] 秦国梁.窄间隙气体保护焊接工艺发展及应用[J].金属加工(热加工),2022(9):8-20.
QIN G L. Development and application of narrow gap gas shielded welding process[J]. MW Metal Forming, 2022(9): 8-20.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>