

起重船用高强钢大厚板焊接残余应力的试验研究

王 信¹ 刘 勇¹ 王 斌²

(1 宜宾职业技术学院, 宜宾 644003)

(2 沪东中华造船集团有限公司, 上海 200129)

文 摘 以某型起重船结构为研究对象,采用焊接后热作为焊接残余应力消除措施,研究结构的残余应力情况及消除措施的有效性。首先采用焊态和经过焊接后热的两组试板进行焊接残余应力检测并对比,结果表明焊态的试板焊接纵向残余应力最高达552.5 MPa,接近材料的屈服强度;经后热的试板纵向残余应力最大为385.3 MPa,与焊态相比降低了167.2 MPa,下降约30%;同时获取了残余应力分布情况。进一步对起重船导向基座结构的焊缝进行后热并进行应力检测,其纵向焊接残余应力最大值为310.8 MPa,远低于母材屈服强度。本文研究表明:起重船高强钢大厚板在焊态时焊接残余应力较大,需采取措施消除残余应力;采用焊接后热可以大幅降低高强钢大厚板的焊接残余应力水平,焊接后热具有较好的经济性和操作便捷性,在起重船建造过程中建议考虑对大厚板焊缝进行后热以消除焊接残余应力消除。

关键词 起重船, 高强钢, 焊接残余应力, 后热

中图分类号: TG404

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.03.013

Experimental Study on Welding Residual Stress of High Strength Steel Plate for Crane Ship

WANG Xin¹ LIU Yong¹ WANG Bin²

(1 Yibin Vocational and Technical College, Yibin 644003)

(2 Hudong-Zhonghua Shipbuilding(Group) Co. Ltd., Shanghai 200129)

Abstract This research focuses on the structure of a certain type of crane ship. It adopts post-weld heat treatment as a measure to eliminate welding residual stress and studies the residual stress status of the structure as well as the effectiveness of the elimination measures. Firstly, two groups of test plates in welding state and after post-weld heat treatment were used to detect and compare the welding residual stress. The results showed that the maximum longitudinal residual stress of the test plate in welding state reached 552.5 MPa, close to the yield strength of the material. The maximum longitudinal residual stress of the test plate after post-weld heat treatment was 385.3 MPa, reduced by 167.2 MPa compared with the welding state, a decrease of about 30%. At the same time, the distribution of residual stress was obtained. Furthermore, post-weld heat treatment was applied to the weld seams of the crane ship's guide base structure, and stress detection was conducted. The maximum longitudinal welding residual stress was 310.8 MPa, far below the yield strength of the base material. The research indicates that the welding residual stress of the heavy-gauge steel plates in the crane ship is relatively high in the welding state, and measures need to be taken to eliminate the residual stress. Post-weld heat treatment can significantly reduce the level of welding residual stress in heavy-gauge steel plates, which is both economical and easy to operate. Therefore, post-weld heat treatment is recommended for weld seams of heavy-gauge steel plates during the construction of crane ships to eliminate welding residual stress.

Key words Crane ship, High-strength steel, Welding residual stress, Post-heat

收稿日期: 2022-09-22

基金项目: 四川省教育厅科研项目(17ZB0501); 上海市科委科研项目资助(15dz1101011); 四川省教育厅科研项目“E型环疲劳试验装置的设计与开发”(18ZB0663); ybzy21extd-01智能采摘机器人科技创新团队

第一作者简介: 王信, 1981年出生, 硕士研究生, 主要从事机械设计与制造方向研究。E-mail: yong_liu86@sina.com

0 引言

近年来海上施工船需求激增,据国内相关船厂信息,2021年以来国内开建的800~4000 t的起重船已超过20艘^[1-2]。起重船的建造,其关键技术之一是高强钢大厚板在多向交叉的焊接接头部位的焊接^[3-4]。主要原因是板材厚度大、存在包括未焊透在内的焊接缺陷风险、同时焊后残余应力不易检测,容易出现应力预估不足,使得构件在使用过程中出现失效破坏。起重船结构焊后残余应力的测定与消除难点在于:焊接接头尺寸太大、焊接接头复杂、盲孔应力测试会损坏被试件、测定成本很高、由于结构空间尺寸而导致许多焊后残余应力消除方法不能较好地应用于工程实际。

刘川等人对大厚板的内部焊接残余应力的分布情况展开了试验研究,其试验方法是采用两次切割轮廓法,试板厚度55 mm且为Q345钢,未对消除方法及后续处理进行研究^[5-6];蔡洪能等人也对钛合金厚板焊接的接头残余应力进行了试验研究,其研究针对钛合金同时也无相对应的消除研究^[7-8]。Lefebvre等人采用不同参数的锤击方法对S690高强钢接头进行消除残余应力研究,表明该方法对残余应力、焊缝表面形态、接头微观组织均有明显改善^[9]。Abdullah等人采用不同焊后热处理对SMAW焊接获得的Cr-Mo锅炉钢焊接接头性能进行了研究,发现试样的断面延伸率、冲击性能均能够得到提高^[10]。综述现有的文献来看,对大厚板EQ56、起重船高强钢结构焊后的残余应力及其消除研究较少。

本文针对这一工程应用现状,以某型起重船导向基座结构为研究对象,其厚板钢材为EQ56,采用试验验证获取试板焊接接头在焊态下未消除残余应力、消除残余应力后两种状态进行对比分析,以评定其残余应力的大小及消除方法的有效性;其试板的材料、焊接工艺参数与起重船焊接工艺一致。进一步对起重船导向基座结构进行消除残余应力后并进行试验测试残余应力。

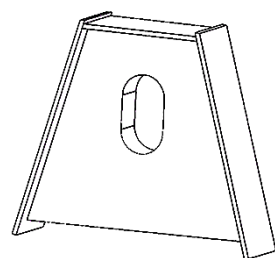
1 试验

综合考虑所分析起重船导向基座结构大厚板的空间尺寸、经济成本、现场施工作业的便捷性等多方面因素,本文先采用焊接试板进行对比试验,在试验结果能够支撑本文所选择残余应力消除方法具有有效性的基础上,再对整个导向基座结构进行残余应力消除并检测。焊接残余应力消除方法较多,但对于起重船这类大厚板且结构复杂的构件往往受到多方面的限制从而导致许多残余应力消除方法较难应用于工程实际。为此,经过诸多尝试以及结合现场

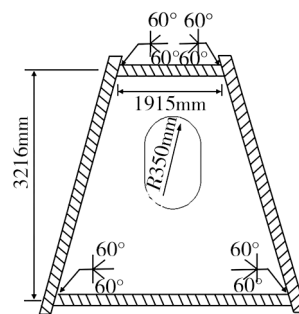
施工情况,本文采用焊接后热(焊接后热是焊接完成后立即加热至后热温度并保温一段时间,再缓冷的工艺措施)的办法对起重船导向基座大厚板进行残余应力消减处理。试验制定两副对接试板,一副试板为焊态未进行焊后后热、一副试板进行焊接后热,试验材料、厚度尺寸与导向基座结构一致,同时焊接工艺与起重船焊接工艺一致。

1.1 试板焊接试验

起重船导向基座具有尺寸大、焊接焊缝复杂、结构受载工况复杂的特点,其三维图和二维焊接示意图如图1所示。对于复杂结构的大厚板焊接,常规采用手工焊条电弧焊SMAW和药芯焊丝二氧化碳气体保护焊FCAW。本试验以导向基座的尺寸和特点作为参考,选用SMAW进行50 mm厚EQ56钢板的对接试验,试验标准按中国船级社材料与焊接规范进行,试板尺寸为400 mm×150 mm×50 mm,焊条选用Conarc80,焊接坡口采用X型坡口,60°坡口角度,焊接完一面以后背面清根再焊接另一面,焊接热输入保持在0.9~1.5 kJ/mm之间,焊前预热90℃。焊接后热选择电磁感应加热,后热温度为350℃,保温时间为2 h,保温后用岩棉包覆盖缓冷。对焊态试板进行焊接残余应力检测,检测设备采用济南西格玛公司的动态应变仪ASMC1-9。



(a) 导向基座结构三维图



(b) 导向基座结构二维焊接示意图

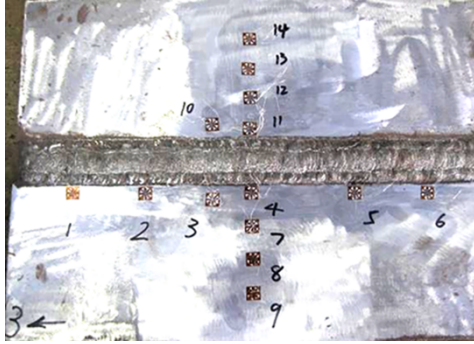
图1 导向基座结构图

Fig. 1 Guide base and hull structure model

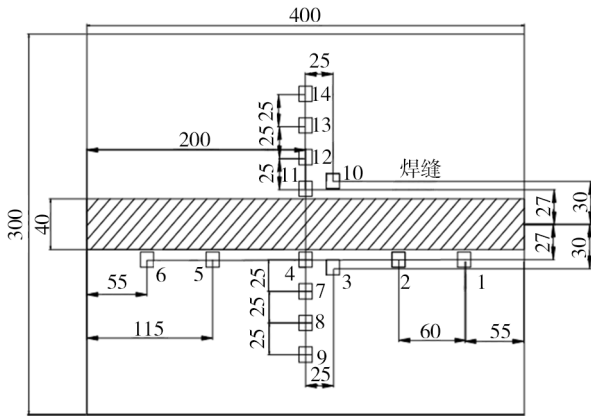
1.2 未后热试板焊接残余应力检测

采用盲孔法进行焊接残余应力检测,应变片选择TJ120-1.5-φ1.5应变花,焊后清理试板焊缝热影响区表面,打磨光亮,用丙酮将打磨区拭擦干净,保

证表面没有油污和灰尘铁屑,在应变片上均匀涂抹502胶水,将其贴到指定区域,保证完全贴紧且粘介面没有气泡,等待约10 min 完全凝固后用ZC25-4型绝缘电阻表测试过桥、应变片是否连接成功,确保每个应变片绝缘电阻大于50 M Ω ,否则拆除应变片重新粘贴;应变片在试板上的粘贴布置情况见图2。



(a) 应变片粘贴实物照片



(b) 应变片布置图

图2 应变片粘贴布置图

Fig. 2 Layout of strain gauge

每个应变片测试点有两个残余应力值:纵向残余应力值(σ_x)和横向残余应力值(σ_y),纵向残余应力与横向残余应力的方向定义如图3所示,纵向残余应力方向平行于焊缝方向,横向残余应力方向垂直于焊缝方向。

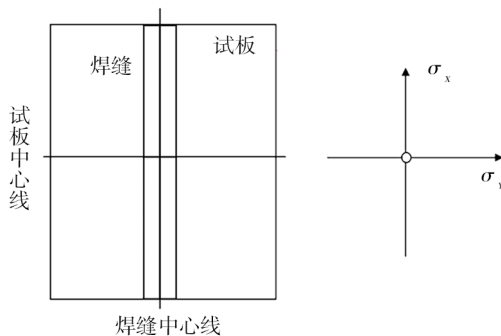


图3 纵向残余应力 σ_x 与横向应力 σ_y

Fig. 3 Longitudinal residual stress σ_x and transverse residual stress σ_y

2 结果与讨论

2.1 未后热试板焊接残余应力分析

焊态下的焊接残余应力检测结果如表1所示,可以看出,在焊缝横截面上(垂直焊缝方向,应变片编号14/13/12/10/11/4/3/7/8/9);纵向残余应力多为拉应力,在焊缝中心线附近达到最大值,焊态下最大纵向残余应力为552.5 MPa。同时,应变片3/10、4/11、7/12、8/13、9/14沿焊缝对称,两对称点的横向应力与纵向应力值存在一定差异,这是由于试验试板采用多道焊完成,同时沿焊缝两侧位置在布置过程中会存在一定误差;靠近焊缝两侧距离最小,应力差异越显著,对称点4/11离焊缝中心距离最近,其纵向应力值相差达到最大,为165.5MPa、横向应力值相差也达到最大,为137.5 MPa。从分布趋势来看,残余应力随着离焊缝中心线距离的增加而减小,并逐渐变成压应力。横向残余应力值的分布趋势与纵向残余应力分布趋势基本一致,但是数值上偏小一些,基本上每一测试点的纵向残余应力值都高于横向残余应力值,最大值为429.5 MPa。在焊缝纵向截面上(沿焊缝方向,应变片编号1/2/4/5/6);纵向残余应力皆为拉应力,在试板中心位置达到最大值(图3),焊态下最大残余应力也为552.5 MPa;其分布规律为在试板中心达到最大值,沿焊缝中心线向两侧递减,但是数值上偏小一些,基本上每一测试点的纵向残余应力值都大于横向残余应力值。

表1 试件焊态下的残余应力检测结果

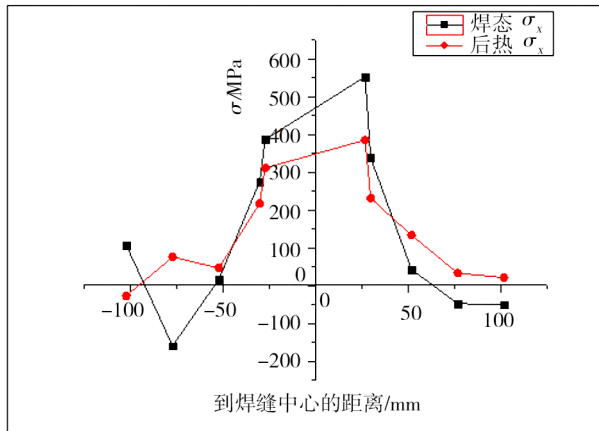
Tab. 1 Test results of residual stress of test piece in welded state

应变片编号	σ_x /MPa	σ_y /MPa
1	280.7	234.7
2	530.3	378.5
3	338.3	269.34
4	552.5	429.5
5	422.4	393.8
6	296.9	278.8
7	43.42	30.96
8	-46.85	-72.80
9	-48.97	-13.3
10	275.4	225.4
11	387.0	292.0
12	17.24	-14.88
13	-158.6	-178.4
14	106.7	93.92

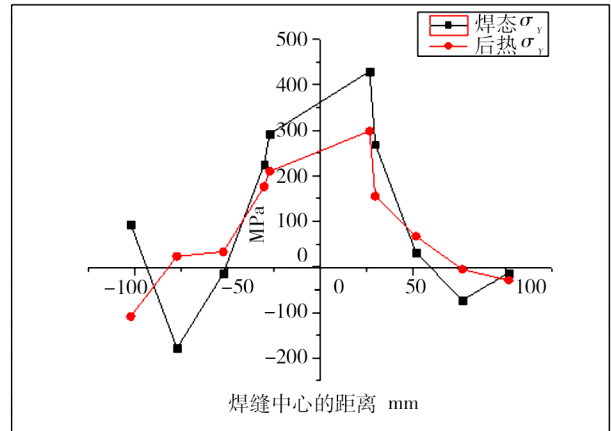
2.2 后热试板焊接残余应力检测与分析

对第二副试板进行后热,并进行焊接残余应力

检测,检测方法与检测位置同上。其检测结果与焊态的残余应力进行对比,对比结果见图4和图5。



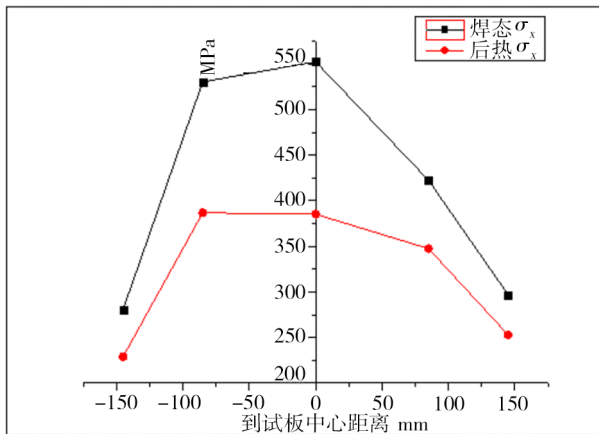
(a) 纵向残余应力



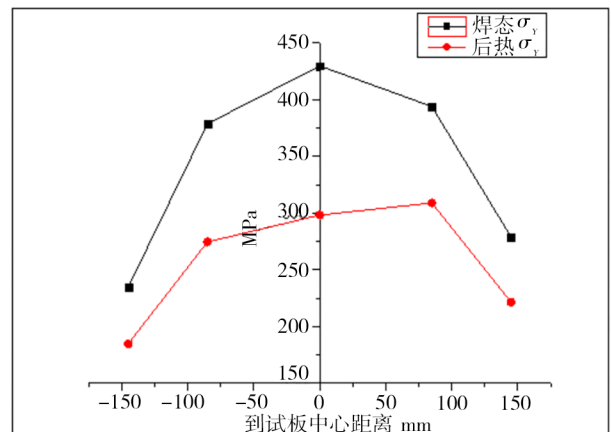
(b) 横向残余应力

图4 沿焊缝方向焊态与后热的应力对比图(14/13/12/10/11/4/3/7/8/9)

Fig. 4 Stress comparison between as welded and post heat along the weld direction (14/13/12/10/11/4/3/7/8/9)



a) 纵向残余应力



b) 横向残余应力

图5 垂直焊缝方向焊态与后热后的应力对比图(1/2/4/5/6)

Fig. 5 Comparison of stress between as welded and heat treated in the direction perpendicular to the weld (1/2/4/5/6)

从图4可以看出,在焊缝横截面上,在同一位置经后热试板的纵向残余应力为385.3 MPa,与焊态相比,其最大值下降了167.2 MPa,下降约30%;从残余应力分布趋势来看,两者相似,随着离焊缝中心的距离增大而减小。横向残余应力值的分布与纵向残余应力分布基本一致,数值皆比纵向残余应力小,最大值与焊态相比下降了141.3 MPa。

从图5可以看出,在焊缝纵截面上,纵向残余应力表现为拉应力,在试板中心位置达到最大值,同样为测试点4;其分布规律与焊态一致,在试板中心达到最大值,沿焊缝中心线向两侧递减。横向应力值的分布于纵向应力分布基本一致,从应力水平上看,纵向应力要大于横向应力。

从图4和图5还可以看出后热状态的试板焊接

残余应力整体上比焊态有大幅下降,说明了后热可以有效减小起重船大厚板的焊接残余应力峰值,改善焊接残余应力分布。

2.3 结构焊接残余应力的消除测试与分析

经上述试验表明,焊后后热对降低高强度大厚板结构残余应力效果较为显著,同时该方法在起重船焊接结构中具有经济性高、操作便捷等特点。本文进一步采用该方法对起重船导向基座局部结构进行焊接后热,后热工艺与试板的后热工艺保持一致,后热设备及施工现场如下图6所示。待后热结束后,在厚板焊缝边缘选择3处进行残余应力检测,应变片编号分别为1、2、3,其粘贴位置分别与图4中应变片编号为1、2、3一致,检测方法与试板检测方法一致,检测结果如表2所示。

表2 导向基座后热后在厚板焊缝边缘残余应力检测结果
Tab. 2 Test results of residual stress at weld edge of thick plate after local heat treatment of guide base

应变片编号	σ_x/MPa	σ_y/MPa
1	273.8	234.6
2	310.8	258.5
3	298.3	254.2

如表2所示,3处检测结果最大纵向残余应力为310.8 MPa,最小纵向残余应力为273.8 MPa;最大横向残余应力为258.5 MPa,最小纵向残余应力为234.6 MPa。从检测结果来看,无论是纵向残余应力还是横向残余应力都远低于板材的屈服强度,使得焊缝有足够的强度储备来满足构件服役过程中的性能要求。同时,进一步表明焊接后热能有效地应用于起重船大厚板焊接构件的残余应力消除。



图6 电磁感应加热设备

Fig. 6 Electromagnetic induction heating equipment

4 结论

(1)本文采用盲孔测试的办法,实测获取了起重船高强度EQ56大厚板的焊接残余应力;其测试结果表明未经残余应力消除措施的焊缝结构残余应力较大,接近材料的屈服强度。因此,起重船导向基座大厚板结构在焊接后需进行残余应力消除。

(2)对试板进行焊接后热以消除残余应力,经检测并与未消除残余应力的焊态试板对比,经焊接后热试板的残余应力显著下降,最大下降约30%。

(3)将焊接后热应用于起重船导向基座进行残余应力消除,并在厚板焊缝边缘位置选择3个测试点进行检测,结果显示经焊接后热焊缝边缘部位的纵向残余应力最大值为310.8 MPa,远低于母材屈服强度,焊缝具有足够的强度储备;焊接后热在起重船大厚板结构的残余应力消除中具有较好的经济性、操作便捷及良好的消除效果等特点,在该结构或类似结构中推荐选择该方法对其进行残余应力消除。

参考文献

[1] 薛雷. 大型船舶主制造商与供应商产品质量激励约束博弈研究[D]. 大连理工大学, 2022.

XUE L. Research on product quality incentive and constraint game between major ship manufacturers and suppliers [D]. Dalian University of technology, 2022.

[2] 王丹阳, 浦润泽. 基于造船供应链的船舶产业集群战略分析[J]. 船舶物资与市场, 2019(11):78-79.

WANG D Y, PU R Z. Strategic analysis of shipbuilding industry cluster based on shipbuilding supply chain [J] Shipping materials and market. 2019 (11):78-79.

[3] 郑振太. 大型厚壁结构焊接过程的数值模拟研究与应用[D]. 天津大学, 2007.

ZHENG Z T. Research and application of numerical simulation of welding process of large thick wall structure [D]. Tianjin University, 2007.

[4] 中国机械工程学会焊接协会. 焊接手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

Welding Association of China Society of Mechanical Engineering. Welding manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.

[5] 刘川, 沈嘉斌, 陈东俊, 等. 大厚板内部焊接残余应力分布实验研究[J]. 船舶力学, 2020, 24(4):484-491.

LIU C, SHEN J B, CHEN D J, et al. Experimental study on welding residual stress distribution in large and thick plates [J] Journal of Ship Mechanics, 2020, 24 (4): 484-491.

[6] 蔡洪能, 李望南, 韩雪成. 钛合金厚板焊接接头残余应力测试[J]. 焊管, 2018, 41(11):1-5, 11.

CAI H N, LI W N, HAN X C. Residual stress test of welded joints of titanium alloy thick plates[J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(11):1-5, 11.

[7] 谷晓梅, 张晓飞, 宋彦宏. 焊接工艺参数对船用高强度钢平板残余应力的影响[J]. 中国海洋平台, 2019, 34(2): 86-94.

GU X M, ZHANG X F, SONG Y H. Effects of welding process parameters on residual stresses of high-strength steel plate for ship[J]. China Offshore Platform, 2019, 34(2):86-94.

[8] 鲁立, 胡梦佳, 蔡志鹏, 等. 核级管端法兰面在线堆焊修复的残余应力[J]. 清华大学学报(自然科学版). 2020(01): 89-94.

LU L, HU M J, CAI Z P, et al. Residual stresses after on-line surfacing welding repairs on the flange surface of a nuclear grade pipe end[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology). 2020(01):89-94.

[9] LEFEBVRE F, REVILLA G C, BUFFIERE J Y, et al. Understanding the mechanisms responsible for the beneficial effect of hammer peening in welded structure under fatigue loading [C]. Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, 2014, 996: 761-768.

[10] AHMED S R, AGARWAL L A, DANIEL B S S. Effect of different post weld heat treatments on the mechanical properties of Cr-Mo boiler steel welded with SMAW process[J]. Materials Today: Proceedings, 2015, 2(4-5): 1059-1066.