

# 船体大合拢环形缝最佳焊接程序的研究

武汉南华高速船舶工程有限公司 王承权 夏炳仁 杜述勇

**摘 要** 测量了同型 3 艘船舶船体大合拢环形缝在 3 种不同焊接程序下产生的焊接变形数值,应用焊接变形及应力理论对测得的数据进行了分析,指出大合拢时焊接变形及应力形成的特点和制定焊接程序的基本原则。

**关键词** 大合拢环形缝 测量 焊接程序

大合拢是指船体总段在船台组装成船体的装配焊接阶段,此阶段是决定船体质量的最重要环节,其中大合拢环形缝的焊接尤为重要。船舶建造规范中,对该环形缝的焊接材料的选择、焊接工艺及条件、质量检验及验收标准等都作了明确的规定,但关于焊接程序用词笼统,不具操作性和检查性。由于缺乏研究条件,关于大合拢环形缝焊接程序的文献资料很少见到,规范中也无明确规定,在技术力量较强、造船实践经验较丰富的船厂,尚有传统的焊接程序,但其技术上合适性,合拢区焊接应力分布的合理性还不能确认;而小型船厂,多半是随意或粗略地执行从其它船厂学到的部分焊接工艺。这种状态导致一些船舶大合拢环形缝区的形状严重偏离线型,往往火工矫正焊接变形多次仍无效果,而且降低了钢材的塑性和韧性,个别情况下甚至使近缝区产生裂纹。本文旨在通过分析焊接程序对焊接变形的影响,以指导造船生产实践和提高船舶建造质量。该研究的基础是焊接变形及应力理论,试验方案的制定及测量数据的分析要以理论来指导。本试验结果证实理论的正确性,同时补充和发展了以前理论上相关的指示条文,因而本工作不仅具有指导生产实践的意义,还有一定的学术价值。

## 1 研究对象及测量

### 1.1 研究对象

凡是采用总段船台合拢的建造方法,都存在船体大合拢环形缝。单独一条船由于不可再现性,无法对比不同焊接程序的影响。最近,武汉南华高速船舶工程有限公司承担一批量沿海岛屿短途高速客船的设计及建造任务,为从事船体大合拢环形缝的研究提供有利条件。

该型船首部从 # 32~350 至首柱为首总段,采用以甲板为基面反造法,然后翻身与后部总段进行合拢。研究对象就是 # 32~350 区域的大合拢环形缝,见图 1。在合拢区要连接的构件有纵向构件(竖龙骨、旁龙骨、舷侧纵桁、甲板纵桁及底纵骨、甲板纵骨及壳板的接缝(纵缝及横缝))。

#32~350 合拢区域需要焊接的接缝有:

- 1) 纵向构件的对接缝(要求焊透,包括面板与面板、腹板与腹板);
- 2) 纵向构件腹板与壳板的角接缝;
- 3) 壳板的对接缝(要求焊透,包括纵缝及横缝)。

上述三类合拢接缝的焊接程序对船体结构的焊

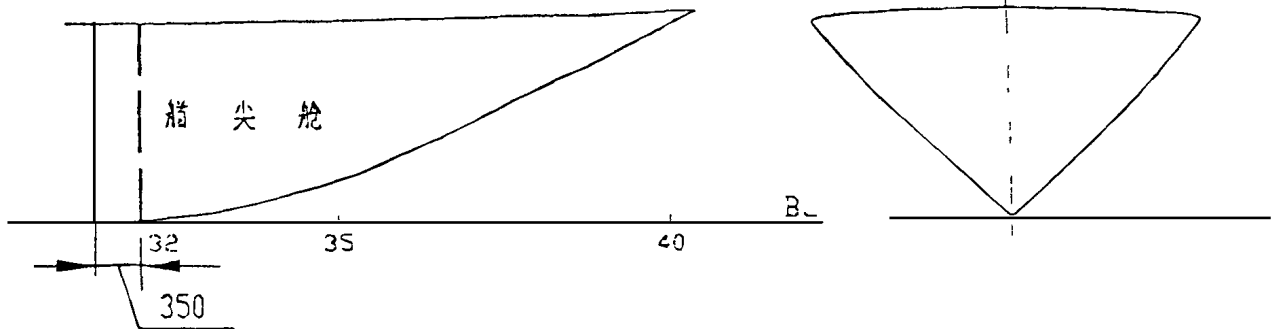


图 1 # 32~350 大合拢环形缝位置图

作者简介:王承权(1945-),男,教授。

接变形及应力的数值和分布都会产生影响,但起主要作用的是壳板对接缝。在 # 32<sup>-350</sup> 合拢区中有 4 个壳板十字缝,它们有共同点,可用图 2 表示。

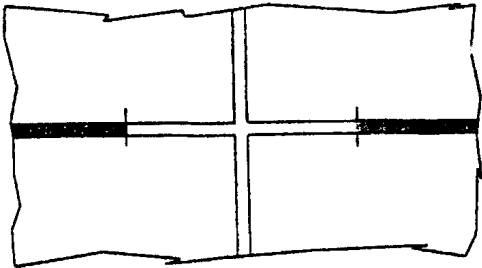


图 2 大合拢区壳板的十字缝

1.2 测量

(1) 测量点的布置

测量点应当位于能最容易显示沿测量方向的位移,又便于测量的区域,实际生产中比较难以做到。我们是在合拢区壳板外侧已装焊“马”板的间隔区间

选择测点。测点的布置,如图 3 所示。

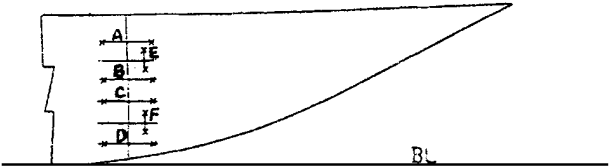


图 3 合拢区测点分布图

对测量点打一个标距(约为 120mm)。在合拢区施焊前测出每个点的实际标距数值,即原始值。在焊接的各个阶段,测量各点标距数值的相应变化即可知道这个阶段焊接引起的合拢区的变形。分析这些变形数值的变化,可以比较各个焊接程序对合拢区变形及应力的分布,为制定最佳焊接程序提供科学依据。

(2) 测量数据

各测量点标距的原始值及各阶段的变化,见表1。

表 1 原始数值及各焊接阶段后的变形 单位: mm

船号	测点	方向	原始读数		构件对接后		纵缝焊后(内)		横缝焊后(内)		结构与壳板后		纵横缝焊后(外)	
			右	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右	左
NHS435-1	A	船长	120.30	120.00	- 0.02	- 0.18	- 0.10	+ 0.40	- 0.84	- 0.92	- 0.16	- 1.00	- 1.02	- 1.26
	E	垂向	118.68	117.70	- 0.04	+ 0.20	+ 0.10	- 0.18	+ 0.04	+ 0.14	- 0.04	+ 0.14	- 0.02	0
	B	船长	120.14	119.42	- 0.12	- 0.04	+ 0.06	+ 0.06	- 0.92	- 1.08	- 0.04	- 1.00	- 1.26	- 1.14
	C	船长	119.70	117.90	+ 0.06	+ 1.32	+ 0.10	+ 0.42	- 1.18	- 1.00	+ 0.22	- 0.18	- 1.00	- 0.60
	F	垂向	118.64	119.18	- 0.10	- 1.14	+ 0.08	- 0.04	- 0.02	- 0.10	0	+ 0.06	- 1.16	- 0.10
	D	船长	120.00	126.00	+ 0.06	- 1.78	0	- 0.02	- 1.04	- 1.32	- 0.10	- 0.12	- 1.08	- 0.90
船号	测点	方向	原始读数		纵缝焊后(内)		横缝焊后(内)		构件对接后		结构与壳板后		纵横缝焊后(外)	
			右	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右	左
NHS435-2	A	船长	119.34	119.34	+ 0.16	+ 0.14	- 0.08	- 1.22	- 0.04	- 0.02	- 0.08	- 0.08	- 0.74	- 0.86
	E	垂向	120.70	118.58	- 0.46	- 0.18	- 0.12	- 0.20	+ 0.04	+ 0.14	+ 0.26	+ 0.10	- 1.52	- 1.40
	B	船长	119.86	119.72	+ 0.02	- 0.02	- 1.06	- 1.42	- 0.04	+ 0.12	- 0.04	- 0.20	- 1.74	- 1.60
	C	船长	118.36	119.92	+ 0.04	+ 0.58	- 0.96	- 1.00	- 0.08	- 0.06	+ 0.06	- 0.30	- 1.68	- 1.00
	F	垂向	121.54	118.66	- 0.10	+ 0.02	- 0.04	- 0.14	- 0.02	- 0.04	- 0.04	+ 0.06	- 1.28	- 1.06
	D	船长	118.76	118.70	+ 0.02	- 0.06	- 1.10	- 1.24	- 0.04	0	- 0.20	- 0.10	- 1.24	- 1.26
船号	测点	方向	原始读数		纵横缝(内)		所有构件角焊缝均焊完		纵横缝焊接后(外)					
			右	左	右	左	右	左	右	左				
NHS435-3	A	船长	115.80	119.84	- 1.60	- 1.38	+ 0.04	- 0.02	- 1.14	- 1.18				
	E	垂向	117.60	119.38	- 0.10	+ 0.46	0	- 0.04	- 1.66	- 1.60				
	B	船长	121.24	121.20	- 1.34	- 1.40	- 1.10	- 0.02	- 1.14	- 1.56				
	C	船长	119.42	119.62	- 1.38	- 1.18	- 0.04	- 0.20	- 1.52	- 1.24				
	F	垂向	119.82	118.82	+ 0.06	- 0.02	- 0.04	+ 0.12	- 0.98	- 1.06				
	D	船长	119.82	118.86	- 1.32	- 1.12	- 0.34	- 0.18	- 0.82	- 1.12				

## 2 各国船级社对合拢区焊接程序的规定

### 2.1 合拢区可能的焊接程序方案

前面已列出合拢区待焊的接缝:纵向构件对接缝,以 A 表示;纵向构件腹板与壳板的角接缝,以 B 表示;壳板的对接缝,以 C 表示。可能的焊接程序方案:

方案 1 C A B;

方案 2 A C B;

方案 3 A B C;

方案 4 B C A(明显地不正确)。

文献[3]在标准中只提供方案 1 焊接程序。文献[4]在建造我国第一艘全焊铝合金艇中采用的也是第一方案。合拢区壳板的对接缝有纵缝和横缝,它们之间的焊接顺序和细节是应当研究的主要问题。

### 2.2 各国船级社对合拢区焊接程序的规定

我国造船技术在改革开放前基本上是沿用前苏联的模式,船舶建造规范中没有关于合拢区焊接程序的原则规定。国内各船厂按传统形成的做法来焊接。

美国船级社 ABS 对于合拢阶段纵缝与横缝交叉区的焊接规定是“非经专门批准,焊缝不得横过未焊的接头,或者超越作为本焊缝终止端的未焊接头<sup>[1]</sup>。”其含义可用图 4 来表示。

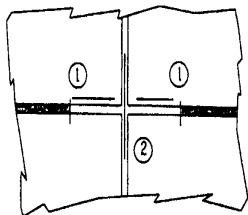


图 4 ABS 的规定

挪威船级社 DNV 为“当横缝与纵缝相遇时,纵缝的焊接应在远离接头处中断,直到焊好横缝后,再继续焊接。横缝的焊接应连续地通过未施焊的纵缝,而为了直通地焊接纵缝,接头处横缝应铲除<sup>[2]</sup>。”图 5 可以表达 DNV 的这段文字的意思。

可见 ABS 和 DNV 的规定显著不同。

## 3 焊接变形理论的提示

### 3.1 合拢区的约束

船台总段合拢的约束比各分段预制阶段的约束要大得多,焊接接头的收缩在很大程度上受到限制。这种限制与船体构架型式有关。纵骨架型式比横骨

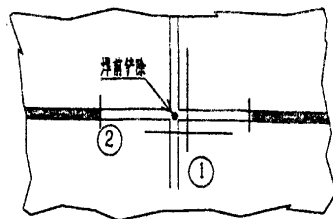


图 5 DNV 的规定

架型式限制程度要大。但是,不论是纵骨架型式,还是横骨架型式,合拢中沿船长方向的约束总是大于沿高度和船宽方向的。应当指出,随着合拢过程的进行,越是在后面焊接的接缝,收缩受到限制的程度越大。在制定焊接程序时应充分考虑这一点。

### 3.2 焊接接头的纵向收缩和横向收缩

焊接变形理论和实验结果表明,沿焊缝轴线方向的收缩,即焊接接头的纵向收缩,单位长度上为<sup>[5]</sup>

$$v = \mu_x \frac{q_n}{c_p} \quad (1)$$

而沿垂直于焊缝轴线方向的收缩,即焊接接头的横向收缩,单位长度上为<sup>[5]</sup>

$$= \mu_y \frac{q_n}{c_p} \quad (2)$$

式(1)和(2)中:  $\mu_x$  为线膨胀系数(—),  $C$  为比热容(J/(g·°C)),  $\rho$  为密度(g/cm<sup>3</sup>),  $q_n$  指形成单位长度上收缩所消耗的焊接线能量(J/cm)。 $\mu_x$  称焊接接头收缩纵向变形系数,与结构刚性(板厚)、散热、原始应力有关,可表达为  $\mu_x = -0.335 K_T K$ , 对一般船体结构,不考虑散热和原始应力时,其值为 -0.335。 $\mu_y$  称为横向变形系数,与沿垂直焊缝轴线方向的固定条件、热透程度、焊接速度、人工冷却、原始应力等因素有关,其相互影响甚是复杂,但有一点是明确的,就是  $\mu_y$  值大约是  $\mu_x$  值的 3 倍,也就是说焊接接头在横向上的收缩远大于纵向的收缩。

### 3.3 残余应力场的控制原则

#### (1) 焊接应力理论和实验数据显示

残余纵向拉应力出现在焊接接头的附近区域(包括焊缝断面),即  $F_s$  区,其数值对于钢材可达到屈服极限。而与其平衡的压应力,数值要小得很多。

#### (2) 与焊缝轴线垂直的残余横向应力分布特点

- 1) 拉压区域交替出现;
- 2) 拉压应力数值相差不大;
- 3) 与焊缝施焊方式(直通焊、从中间向两端、分段退焊等)密切相关;
- 4) 沿焊缝轴线方向的约束,对拉应力区域和数

值影响很大。

从这一点来看合拢区某一接头的横向应力,其应力已不是焊接应力,而是属于反作用应力。

### (3) 应力

船体结构中沿船长方向的应力(总纵应力)是主要的,而船宽和船高方向的应力小得多。评定一个焊接程序的合适性,就是要看它所形成的残余拉应力场与船体的总纵应力叠加后的影响如何。

## 4 测量结果及分析

1) 测量记录经过处理得到合拢区各焊接阶段后被观测标距的变化量,即焊接变形量,如表 1 所示。表中数值前“+”表示标距增量;“-”表示标距减量。NHS435-1 和 NHS435-2 都是有五个焊接阶段,仅先后次序有别。而 NHS435-3 只有三个焊接阶段。

2) 三艘船各测量点的变形沿船长方向的平均值和垂直方向的平均值,见表 2。

表 2 测量点收缩的平均值(mm)

船号	船长方向		垂直方向	
	右舷	左舷	右舷	左舷
NHS435-1	- 1.09	- 0.97	- 0.59	- 0.50
NHS435-2	- 1.35	- 1.18	- 1.40	- 1.23
NHS435-3	- 1.15	- 1.28	- 1.32	- 1.33

从表 2 看出合拢区所有焊接工作完毕后,三艘船的各测量点的变形均为收缩(一),并且与焊接过程划分的阶段数量及焊接先后次序无关。

NHS435-1 由于先将纵向构件焊接起来,使壳体环缝焊接时收缩的约束比 NHS435-2 及 3 号船体

的要大,因而收缩量就比较小。可以推测,1 号船环缝中的横向应力(沿船长)将要比 2、3 号船的大一些。

比较表 1 中 1 号及 2 号船的纵缝焊后(内)及横缝焊后(内)的变形数值可知,前者的变形特点是“+”,“-”都有,数值偏小,而后者全是收缩(一),并且数值较大。可见,横缝的焊接对变形起主要作用。

3) 纵缝的残余纵向拉应力(与船体总纵应力方向一致),仅位于  $F_S$  区( $F_S$  面积远小于环缝面积),而环缝的残余横向拉应力(与船体总纵应力方向一致)占环缝的至少一半的面积。因此越是降低环缝横向残余拉应力数值的焊接程序,应当越是优选的焊接程序。

## 5 结 论

1) 合拢区变形的测量结果与焊接变形理论的一般规律相符。以焊接变形理论为基础拟定合拢区最佳焊接程序是可行的。

2) 合拢区的焊接程序以先焊板缝,再焊纵向构件对接缝,最后焊接纵向构件腹板与壳板的角接缝为佳。

3) 合拢区的板缝,以先焊环缝,把与纵缝交叉处的环缝中的焊缝铲除后,再把纵缝焊接为宜。

### 参考文献

- 1 美国船级社 ABS. 铝船建造和入级规范. 1975 年
- 2 挪威船级社 DNV. 高速轻型艇入级规范. 1985 年
- 3 日本标准. 铝合金船体建造实用标准. LWS W8101-1981
- 4 邱铁男, 杨贵臣. 铝合金船焊接变形的控制. 船舶工程, 第 3 期, 1997
- 5 C. A. 库兹米诺夫, 王承权译. 船体结构的焊接变形. 北京, 国防工业出版社, 1978

### (上接第 41 页)

舰船主动力锅炉同屏热偏差图及过热器壁温总体分布三维仿真图(图 5)告诉我们,由吸热偏差、结构偏差和流量偏差等原因造成了锅炉过热器末端靠中间部位温度较高,而管数在 80 至 99 左右出现低温过热现象。在运行和中要对高温部位予以关注。注。而锅炉过热器的设计者,要注意处理高温和低温部位的均衡。

## 5 结 论

系统按照面向对象的程序设计方法设计,具有模块性、封装性、继承性、可移植性和易维护性。系统基于 Windows 平台的 32 位应用软件包,符合计算机的发展趋势;系统具有运行稳定、维护方便的特点;系统实现了离线诊断及控制,用户根据系统准确的仿真结果及提示,对锅炉运行作及时调整,达到锅炉最优运行模式。

故障诊断专家系统可以对在线运行的锅炉过热器进行预测性维护,即通常所说的第三种维护。这样既可以防患于未然,又可以避免不必要的停炉,大大地提高了锅炉运行的安全性和经济效益。对锅炉的设计而言,本系统可以对设计所选定的锅炉过热器进行预先诊断检测,帮助选定过热器类型和进行热偏差计算。对炉型的改进和新炉型的设计提供了依据。

### 参考文献

- 1 袁益超, 陈之航. 大容量电站锅炉过热器和再热器系统研究的现状和发展. 动力工程, 1993(6)
- 2 王孟浩. 复杂过热器连接系统的流量偏差的计算. 动力工程, 1983(4)
- 3 马宪国, 陈之航. 电站锅炉故障诊断专家系统的研究与应用. 动力工程, 1992(6)
- 4 徐利军. 大型电站锅炉过热器/再热器故障诊断专家系统的研究. 华东工业大学学报, 1994. 5
- 5 陈伟. 大型电厂锅炉再热器、过热器在线故障诊断计算机专家系统. 哈尔滨工程大学学报, 1998

**Key words** Simulation ,Diesel engine ,Turbocharged system

**Fuzzy Synthetic Evaluation for Ship 's Propeller Shafting Design** ..... Han Guiguo, Xu Xiaoxin and Rong Lu(36)

The structural model for synthetic evaluation of marine propeller shafting is established. By applying hierarchy analysis method, the calculation of the weight for the evaluation index is made and the function of the subordinate degree for the main index is discussed. A concrete evaluation is made for two design scheme of propeller shafting for a ship. The calculation results show that the proposed method can appropriately evaluate the designs of ship propeller shafting.

**Key words** Propeller shafting ,Fuzzy synthetic ,Evaluation method

**Fault Diagnosis Expert System for Marine Boiler Superheater** ..... Shi Xiaocheng, Zhao Junxian and Others(40)

Based on the new thermal deviation theory in combination with the expert theory, a mathematical model of fault diagnosis expert system is set up and a diagnosis expert system is developed for a marine boiler superheater. The system can made analogy computation for the thermal deviation of the boiler superheater and the temperature of the boiler pipe, then, the defects of the components of the boiler superheater can be found out on the basis of analysis. The proposed system is useful for the running of boiler.

**Key words** Boil hotter ,Fault diagnosis ,Expert system

**Key words** Painting dressing ,Vacuum sandblasting ,Water ballast tank

**Optimum Welding Sequence for Circular seam of Hull Erection** ..... Wang Chengquan , Xia Binren and Others(42)

The welding deformation of circular seam for hull erection was measured for three sister ships under three different kinds of welding sequence. Based on the analysis of measured data using welding theory the features of welding stress and deformation in the process of erection are discussed and an optimum welding sequence is proposed.

**Key words** Hull erection ,Circular seam ,Welding sequence

**On-line Expert Controller Design Based on Predication of Ship 's Motion by a Neural Network** ..... Lin Li, Li Zigang, Wan Dejun(46)

This paper presents an online expert controller by a neural network, which can follow the changes of the navigational environment and the dynamic characteristics of the ship steering in condition of ensuring the stability of the control system. The simulation results show that the designed control system is quite satisfactory due to the simplicity of the algorithm and it can easily be realized online.

**Key words** Expert system ,Neural network ,Ship steering and control

**Setting-up of Mathematic Platform and Simulation of Shipborne Strap-down Minehunting Sonar Array** ..... Deng Zhihong, Liu Sheng(50)

A mathematic platform model of the transform relationship among the command signal of rotation angle and course control signal of the serve system, and the attitude angle of the ship motion is set up for a minehunting sonar array under the condition of linear displacement of the array due to the ship oscillation. The simulation results show that the proposed platform model is feasible, which provides a theoretical basis for the construction of stabilized platform and realization of the control stabilization system for the strap-down minehunting sonar array.

**Key words** Sonar array ,Mathematical platform ,Simulation

**Local Path Planning Method for AUV Based on Fuzzy-neural Network** ..... Duan Qunjie, Zhang Mingjun and Others(54)

The real-time local path planning problem of AUV (Autonomous Underwater Vehicle) is discussed based on fuzzy-neural network theory. The planning algorithm is proposed to realize the fuzzy control planning according to the strengthening learning, self learning and adjusting. The simulation tests show the validity and feasibility of the proposed method.

**Key words** AUV ,Fuzzy-neural network ,Strengthening learning ,Path planning

**Computation of Short Circuit Current For Synchronous Generator With Rectified Loading** ..... Zhao Changshun(59)

Damper windings have an important effect on the values of short circuit current for a generator. Calculation and analysis were made for the maximum short circuit current at short circuit of D. C. side for the rectified system of the synchronous generator with and without damper windings. It is indicated that the maximum peak value of the short circuit current at D. C. side is equal to that at A. C. side for the rectified system of three phase synchronous generator, and the minimum peak value of the short circuit current at D. C. side is equal to 0.93 times of that at A. C. side in relation to the initial position of the rotor at short circuit.

**Key words** Synchronous generator ,Rectified system ,Short circuit current

**The Application of GA & ANN to the Optimization of Mooring Hook** ..... Xiang Yi, Tan Jiahua and Fu Zhengrong(62)

The optimum design of mooring hook is of important significance in ensuring the ship safety. By using ANSYS, the calculation of maximum stress for sixteen mooring hook was made and the training was carried out. The generation ability of the BP network after training can be used to replace the calculation of ANSYS, which makes the optimization of mooring hook to be possible, the calculation results proves the proposed method to be feasible.

**Key words** Mooring hook ,Strength calculation ,ANN ,GA ,Optimization

---

**SHIP ENGINEERING**

Overseas Distributor :

10 Hengshan Road ,Shanghai 200031 , China

China International Book Trading Corporation

P. O. Box 399 , Beijing 100044 , China

---