

# 船体分段钢结构焊接过程仿真

刘黎明<sup>1</sup>, 梁国俐<sup>1</sup>, 刘玉君<sup>1</sup>, 郑 赞<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学材料工程系, 大连 116024; 2. 大连造船厂焊接研究所, 大连 116020)

## 摘 要

通过有限元与神经网络相结合的方法,模拟了船体上层建筑、舷侧分段钢结构典型部位的焊接过程,并对其温度场、位移场进行了仿真,分析了组焊工序、焊接工艺参数对上述分段钢结构焊接变形的影响。研究结果表明,采用有限元与人工神经网络相结合方法,可以快速分析、预测船舶钢结构的焊接变形,且仿真结果与实焊数值能较好吻合。并分析出影响船体分段钢结构焊接变形的主要因素是钢板拼焊后产生的残余应力,增加消除焊接应力工序,可以明显降低船体分段钢结构焊后产生的变形量。

**关 键 词:** 船舶、舰船工程;分段钢结构焊接仿真;有限元;人工神经网络

**中图分类号:** U671.83 **文献标识码:** A

## 1 前 言

焊接变形是船舶制造过程中一直存在的问题,它不仅影响船体的外观质量,而且也严重影响船体结构及水动力性能。为了减小焊接变形,准确分析焊接过程中产生的变形是一个重要课题。然而,由于在实际焊接过程中影响焊接变形的因素较多,故难以预测,尤其是对船舶这种大型复杂的钢结构,其焊接变形的预测更加困难。本文以军用船舶高强钢为研究对象,在物理模拟与有限元分析基础上,借助人工神经网络研究手工焊接过程中焊接变形变化规律和影响焊接变形的主要因素,提出抑制焊接变形的有效工艺措施,实现对其焊接变形进行快速预测和预报。

## 2 试验材料及实验方法<sup>[1~3]</sup>

### 2.1 船舶高强钢基本性能

本文采用的船舶高强钢的化学成份如表 1 所示。钢板力学基本性能如表 2 所示。设定实验材料热物理性能参数不随温度变化,如表 3 所示。

表 1 船舶高强钢板的化学成分(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.135	0.57	1.03	0.022	0.008	0.61	1.20	0.10

表 2 实验材料的力学性能

温度 (°C)	屈服强度 (MPa)	拉伸强度 (MPa)	延伸率 (%)
500	510	650	25

表 3 实验材料的热物理性能

比热 (J/kg·°C)	导热系数 (J/mm·°C)	线膨胀系数 (10 <sup>-6</sup> /°C)	弹性模量 (MPa)
0.5	0.04	10	200000

### 2.2 试验方法

#### 2.2.1 焊接参数影响试验

本文采用手工电弧焊方法焊接船舶高强钢。焊接工艺参数主要考虑了焊接电流、焊接次序和钢板厚度的影响。试验钢板如图 1 所示,其中钢板尺寸为 1500mm×1000mm×4mm;球扁钢尺寸为 1500mm×60mm×10mm;两球扁钢间距为

400mm(居中对称放置在钢板上,二者之间采用点焊刚性固定,点焊间距 500mm、长度 50mm);钢板每侧边采用卡铁对称固定。图中虚线结合点表示焊接变形实际测量点。

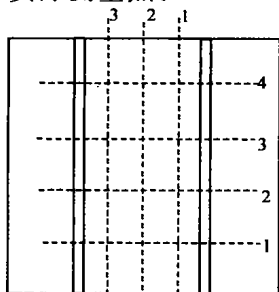


图 1 船舶高强度钢组焊钢结构示意图

焊接顺序为以下三种:(1)逆向连续焊接;(2)逆向分段退焊;(3)同向分段退焊。如图 2 所示。

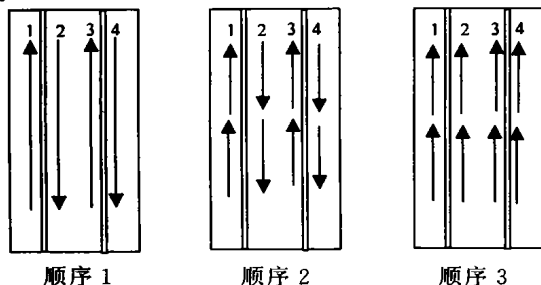


图 2 计算机仿真不同焊接顺序示意图

### 2.2.2 组焊工序试验

如图 3 所示,按 1:1 比例,取船体舷侧分段中部分钢结构(8#-200~12#+200、2 甲板上第 2 根纵向开始共 5 根纵骨)、上层建筑分段中部分钢结构(13 号壁~14 号壁取 5 根扶强板、85#-200~89#+200),分析组焊工序对焊接变形的影响。

通过物理模拟试验和有限元分析获取试验样本,作为神经网络分析预测的输入、输出样本,建立船体分段钢结构和舷侧分段钢结构焊接模型。并在此基础上分析焊接工艺参数、组焊工序对典型分段钢结构焊接过程温度场、位移场的影响,探索最佳组焊工艺。试验方案如图 4 所示。

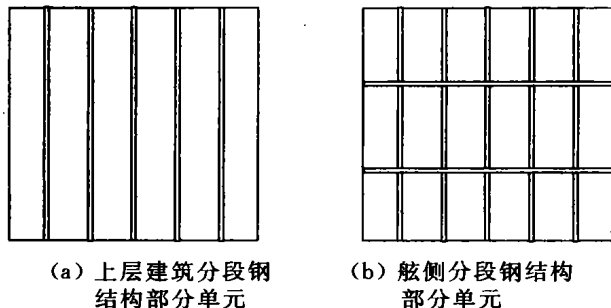


图 3 分段钢结构组焊示意图

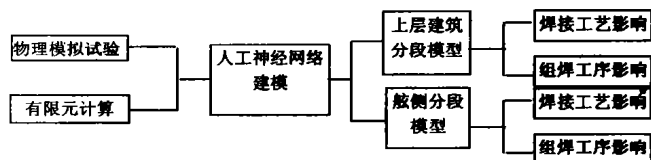


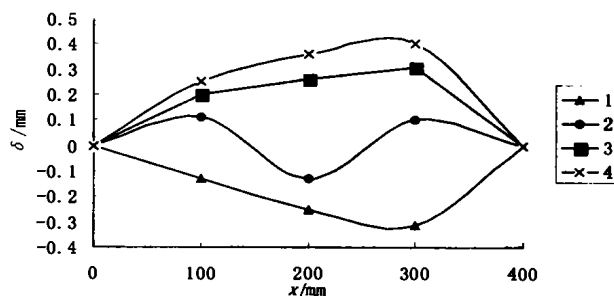
图 4 计算机仿真船体分段钢结构焊接过程技术路线

## 3 实验结果分析

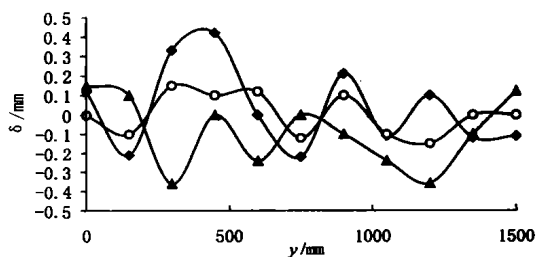
### 3.1 焊接工艺参数对分段钢结构焊接过程影响

焊接工艺参数对船舶高强度钢焊接变形的分析预测可参考文献[4]中的结论。

以 4mm 板厚为例,采用  $\phi 2.5\text{mm}$  焊条同向分段退焊焊接,焊接电流取 95A,焊角  $\Delta 3\text{mm}$ ,每根焊条焊接长度 180~200mm。焊接位移场分布如图 5 所示,此时焊接变形最小。图中: $x$  为垂直于焊缝两球扁钢之间的距离; $y$  为平行于焊缝的距离; $\delta$  为变形量;1、2、3、4 的位置如图所示。



(a) 垂直于焊缝方向

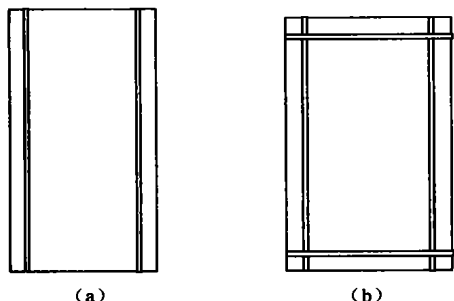


(b) 平行于焊缝方向

图 5 焊接顺序 3 引起两球扁钢间变形量

### 3.2 组焊工序对分段钢结构焊接过程影响

从图 3 中取上层建筑、舷侧分段钢结构部分典型单元如图 6 所示。上层建筑部分有限元模型采用四节点四边形单元,共 1579 个单元;舷侧分段部分有限元模型采用四节点四边形单元,共 16790 个单元。



(a) 上层建筑分段  
钢结构部分单元

(b) 舷侧分段钢结  
构部分单元

图 6 数值模拟上层建筑、舷侧分段  
钢结构部分单元示意图

模拟结果如下:

不考虑 945 钢板拼焊产生的变形,分段钢结构最大凸、凹变形量如下:

上层建筑分段钢结构典型单元变形量:

0.6592mm~ -0.8470mm;

舷侧分段钢结构典型单元变形量:

0.3221mm~ -0.4061mm;

而通过焊接实际上层建筑、舷侧分段钢结构时产生的最大凸、凹变形量为:

上层建筑分段钢结构典型单元变形量:

1.9mm~ -1.7mm;

舷侧分段钢结构典型单元变形量:0.9mm~

-1.0mm;

通过上述比较,发现模拟结果与实验实测值之间存在较大误差。为此,考虑到 945 钢板埋弧自动焊拼焊过程,则分段钢结构最大凸、凹变形量如下:

上层建筑分段钢结构典型单元变形量:

1.945mm~ -1.809mm;

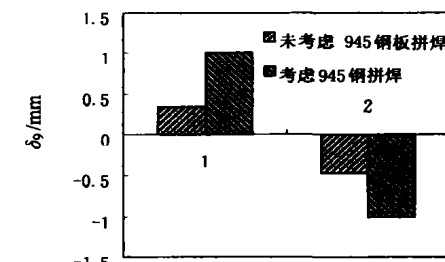
舷侧分段钢结构典型单元变形量:1.102mm

~-1.128mm;

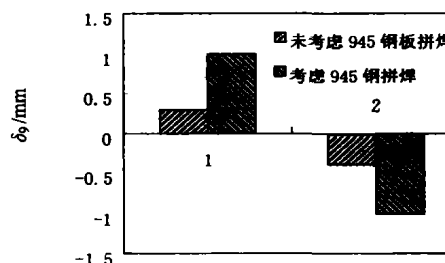
与实际焊接变形测量值比较(实际情况),发现模拟焊接变形的分析结果与实际焊接测量值较好接近。由此可见由于考虑 945 钢板拼焊过程,而使得数值模拟结果与实际焊接测量较好吻合。图 7 为 945 钢板拼焊对结构焊接变形的影响,其中横坐标 1 表示凸变形量,横坐标 2 表示凹变形量。通过比较可以看出 945 钢板埋弧自动焊将使分段钢结构的变形量成倍增加。

计算机仿真中对 945 钢结构拼焊产生的变形及应力状态均未考虑,造成模拟结果与实验存在较大误差,这也是实际焊接中 945 钢发生较大角

变形的原因。同时 945 钢材原始板材状态,也将对 945 钢模拟分段钢结构构件焊接变形产生一定的影响。可以认为,在上层建筑、舷侧分段钢结构焊接前设法消除板材拼焊变形、释放应力,将有效减小钢结构角变形所产生的“瘦马”现象,可以使模拟分段钢结构因焊接产生的角变形量控制在计算机预测预报变形范围内。



(a) 上层建筑分段钢结构



(b) 舷侧分段钢结构

图 7 945 钢板拼焊对结构焊接变形的影响

## 4 结 论

根据计算机数值模拟结果,为减小 945 钢“瘦马”现象,应采用以下工艺措施:

(1) 在 945 钢结构焊接过程中,建议采用同方向退焊工艺,焊接电流取下限。

(2) 在上层建筑、舷侧分段等分段钢结构焊接前,建议增加校平工序,减小 945 钢拼焊产生的变形,这就显著减小 945 钢“瘦马”现象。

## 参 考 文 献

- 1 Michaleris P and DeBicari. Prediction of welding distortion[J]. Welding Journal. 1997,1:76~80.
- 2 Zhao H Y, Lu A L. Simulation on welding process of T-joints[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000,13(1):205~211.
- 3 魏艳红,刘仁培. 不锈钢焊接凝固裂纹应力应变场数值模拟结果分析[J]. 焊接学报,2000,21(2):36~38.

4 刘黎明,梁国俐. 基于人工神经网络的船舶高强度钢焊接

变形分析预测[J]. 焊接学报, 2002, 23(1): 27~29.

## Simulation on Welding Process of Marine Block Steel Construction

LIU Li-ming<sup>1</sup>, LIANG Guo-li<sup>1</sup>, LIU Yu-jun<sup>1</sup>, ZHENG Zan<sup>2</sup>

(1. Dept. of Material Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Dalian Dockyard, Dalian 116020, China)

### Abstract

Based on finite element analysis (FEA) and artificial neural network (ANN), the simulation on the welding process for typical steel construction of superstructure and broadside is carried out. The temperature fields and displacement fields are modeled. The effect of the welding procedure, the welding technical parameters, etc. on the welding deformation is analysed. The research results show that the welding deformation of marine steel construction can be rapidly analyzed and predicted by combining finite element analysis with artificial neural network, and the simulated results are close to the test results. The analyzed results also show that the main factors affecting the welding deformation on marine block steel construction are the residual stress and residual deformation, which are generated in the process of steel plate butt-welding. The welding deformation can be obviously decreased by appending the procedure of removing the residual stress.

**Key words:** ship engineering; welding process simulation; finite element analysis; artificial neural network; block steel construction

### 作者简介

**刘黎明** 男, 1967年生, 博士, 副教授, 毕业于哈尔滨工业大学焊接专业。主要从事新材料焊接性及焊接过程数值模拟研究。

**梁国俐** 女, 硕士研究生。主要从事焊接过程的数值模拟研究。

**刘玉君** 男, 1962年生, 教授, 博士生导师。主要从事水火弯板的研究。

**郑 赞** 男, 1958年生。主要从事焊接方面的研究。