

预测船体分段焊接变形方法概述

李 鸿¹, 任慧龙², 曾 骥²

(1. 哈尔滨工程大学 建筑工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 船体分段在焊接过程中产生的焊接变形会使船体结构强度降低, 精确预测和控制焊接变形是现代造船工艺的要求. 焊接变形分析方法包括实验法、解析法、数值分析法、等效载荷法等, 常用的是后两种方法. 数值分析法采用热弹-塑性有限元模型精确模拟焊接现象, 但计算工作量大; 等效载荷法计算焊接区域的固有应变, 并将其转化为等效载荷, 进而应用弹性有限元分析求得整个结构的焊接变形.

关键词: 船舶; 焊接变形; 固有应变; 等效载荷法; 热弹-塑性分析; 船体分段
中图分类号: U671 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6982 (2005) 05-0055-04

General Review of Prediction Methods of Ship Structures' Welding Deformation

LI Hong¹, REN Hui-long², ZENG Ji²

(1.School of Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2.School of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: *Deformations of a welded ship structure will reduce the structure strength. Developing a precise method to predict and control the deformations is essential for modern shipbuilding. The usual prediction methods of welding deformation include experimental method, analytical method, numerical method and equivalent load method, and the latter two methods are more commonly used. The numerical method enables the simulation of welding process by thermal elasto-plastic finite element model. But it requires very much computing time. When using equivalent load method, the distribution of inherent strain in the welded region and equivalent loads induced by the inherent strain must be calculated. Then the final deformations are calculated by finite element analysis.*

Key words: *ship; welding deformation; inherent strain; equivalent load method; thermal elasto-plastic analysis; ship structure*

1 前言

由于油轮、集装箱船、舰艇等大型船舶流线型结构和内部设备的要求, 他们都是分段焊接建造而成的. 在焊接过程中, 焊接点附近会被加以局部热量, 焊缝及其附近区域不均匀的温度分布会产生不相容的应变, 不相容应变的积累会导致变形. 完全冷却后出现的焊接变形会给船体下一阶段的焊接和装配带来很大的困难, 还会引起舱壁和外(壳)板的凹凸变形, 使船体结构强度降低. 在分段合拢时, 需要花费大量的时间进

行矫正和修正工作. 因此, 为了确保分段的精确性, 必须在设计阶段预测出分段制造过程中所出现的焊接变形, 且在生产中赋予使分段的变形量最小的确切焊接余量.

特别是某些特殊的分段, 例如化学品船的不锈钢内舱壁, 其焊接变形远较碳钢为大, 且不能再用热加工的方法进行矫正, 这就更要求准确地进行焊接变形的预测, 掌握预留反变形的办法. 因此, 船体分段焊接变形预测与控制技术的研究和开发, 对提高焊接质量

收稿日期: 2004-11-22; 修回日期: 2005-03-24

基金项目: 哈尔滨工程大学基础研究基金项目

作者简介: 李鸿(1969-), 女, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为工程力学.

和生产效率, 增强我国造船行业在国际竞争中的技术优势具有重要的现实意义.

2 焊接变形分类

由焊接变形的方向性可分为纵向变形和横向变形. 纵向变形是由焊缝方向的收缩应变产生的, 包括纵向收缩, 纵向弯曲等; 横向变形则是由与焊缝方向垂直的收缩应变产生的, 包括横向收缩、剪切变形和角变形等^[1], 如图 1 所示. 另外, 也可以在整个空间范围里, 把焊接变形分为平面内变形和平面外变形. 平面内变形包括横向收缩、纵向收缩和剪切变形. 平面外变形包括角变形、纵向弯曲、扭曲变形和屈曲变形.

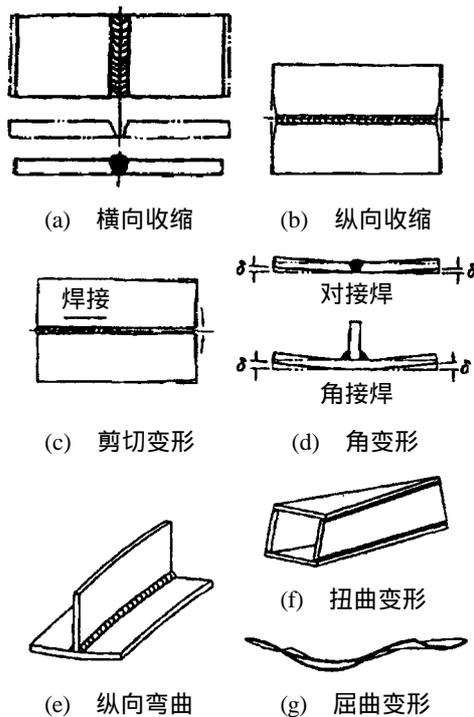


图 1 焊接变形的分类

3 预测焊接变形的的方法

预测船体分段焊接变形的的方法应当能够考虑不同的焊接参数和模型形状, 并且能够反映出在装配过程中的形状变化, 此外, 由于预测变形量和确定余量是个重复的分析过程, 所以要求计算效率高, 且能保证合理的精度. 目前有实验法、解析法、数值分析法和等效载荷法等多种焊接变形分析方法.

3.1 实验法

20 世纪 30 年代的焊接变形研究是以实验和经验来导出各类焊接变形模型的. 焊接时由于收缩、弯曲、角变形等作用使分段产生变形, 因此需要在板构件上

预留一部分焊接余量, 焊接余量通常是通过经验、实验及实测资料给出的. 有关焊接变形的测量, 需根据建议参数来安排测量数据, 推导参数间的关系. 这种推导出的参数间关系一般被限制在专门的变形模式上. 由于真实结构的复杂焊接变形是由多个基本变形组合而成, 而且每个基本变形的作用不能通过有限的实验结果来分清, 所以实验法只能用于估算简单结构的特定变形.

3.2 解析法 (弹性理论法)

解析法是基于经典弹性理论、忽略热弹-塑性过程的焊接变形研究法. 20 世纪 50 年代, 苏联的 H.O. 奥凯尔布朗母用图解的形式提出了一维解析残余塑变法. 后来, C.A. 库茨米诺夫在此理论上作了进一步的发展, 并形成了一个较完整的理论体系^[2]. Watanabe 和 Satoh 从分析焊接条件对焊件收缩变形的影响入手, 分析了焊接热输入和外部约束与收缩变形的关系, 并得出相应的简单关系式. Ueda 等人通过线性加热法也对焊接加热条件与变形间的关系进行了研究. 此间日本学者提出了固有应变的概念, 固有应变指焊接过程中产生的热应变和塑性应变. 焊接完毕, 焊接构件完全冷却后, 热应变为零, 此时固有应变等于塑性应变, 这是焊接完毕后残余的应变, 又叫残余塑性应变. 解析法只考虑残余塑性应变, 并假设所有区域 (包括固有应变区) 都保持弹性. 这种方法把焊接构件与固有应变分布以数学方式理想化, 也正暴露了它的缺点, 如弹性理论问题的解决是有限的, 对于大型复杂结构是不可能求解的, 固有应变的大小和区域应该通过实验结果来获得等, 说明解析法的应用价值较低, 但是它为之后出现的数值分析法和等效载荷法打下了重要的基础.

3.3 数值分析法 (热弹-塑性分析法)

真正的焊接变形数值分析法研究是从 20 世纪 60 年代 ~ 70 年代随着计算机技术的发展, 出现了有限差分法、有限元法、边界元法等数值分析法之后开始的, 因为它们是它们对现实情况的模拟成为可能. 数值分析法模拟焊接的物理现象, 由焊接时的热传导分析和考虑温度分布的热弹-塑性分析构成. 热弹-塑性分析模型由经历温度变化和弹性过程的焊接构件构成, 通过焊接构件随温度变化的弹-塑性过程, 求出最终的固有应变.

日本的 Ueda 和 Okumoto 等以有限元法为基础, 提出了考虑材料力学性能与温度有关的焊接热弹-塑性分析理论^[3]. Hibbitt 和 Marcal 也在这方面做了大量

的计算. Friedman 运用有限元计算了有关平面及轴对称的对接焊问题. Musubuchi 专门建立了分析平面应力和平面应变问题的二维有限元模型. 为准确描述熔池中的热能分布, Pavelic, Tsai, Goldak 等建立并发展了三维有限元焊接过程仿真. 自 20 世纪 80 年代初, 国内的学者, 如哈工大的武传松、田锡唐等也进行了关于焊接热弹-塑性理论及数值分析方面的研究工作. 上海交大的陈楚和汪建华等在焊接变形预测理论和数值模拟技术方面做了大量的研究工作. 要求出准确的解, 需要满足两个条件: 一个是要准确模拟复杂的焊接物理现象; 另一个是由于焊接是热急剧膨胀的过程^[4], 所以要导出正确的计算方法. 数值分析法可以综合考虑焊接过程中的几何非线性、材料非线性和状态非线性, 同时分析变形、应力、温度、状态变化等焊接现象. ABAQUS、ANSYS 等商用软件都基于有限元法模拟了焊接过程中的热弹-塑性过程. 焊接结构的专用软件 SYSWELD 给焊接变形的分析带来更多的便利. 但精确的热弹-塑性分析需要很长的计算时间. 超级计算机模拟简单结构的焊接过程需要数百秒的时间, 普通工作站则需数天. 因此, 实际上使用数值分析法对大型实际结构的焊接过程进行精确模拟是不可行的.

3.4 等效载荷法

等效载荷法用弹性理论分析焊接变形时对结构所加的载荷, 它忽略焊接变形过程, 把等效载荷作用在结构上, 通过弹性有限元分析, 计算出结构的最终变形量. 这种方法需要准确求出描述焊接变形力学特性的等效载荷. 根据载荷的计算方法, 可分为实验等效载荷法与固有应变等效载荷法.

实验等效载荷法是把由实验测得的变形量用等效的力和力矩来求得的方法. Ueda 最初提出了求出相应于角变形的等效力矩的方法. Nomoto 为了求出等效载荷, 利用了 Satoh 的实验推导式. Kim 为了求出角接焊的角变形与纵向弯曲变形的等效载荷, 把实验数据代入到 Ueda 提出的等效力矩方程. 显然, 实验等效载荷法是直接利用实验数据求出等效载荷的, 所以在求不断积累多种变形的船体分段的变形量时, 计算就显得格外复杂, 而且不能反映分段制造过程中的形状变化.

固有应变等效载荷法是求出焊接点附近的固有应变, 且把得到的数据在焊接断面上进行积分求出等效载荷的方法. Watanabe 通过 GMAW, SMAW 等多种焊接实验求出了固有应变区域的宽度与深度. Ueda 为了求出残余应力进行了焊接构件截断实验, 测得了弹性

应变的分布, 且利用其结果提出了求出 3 维固有应变分布的方法. Seo 则通过一维杆-弹簧模型计算出了固有应变. Seo 所研究的固有应变方程包括了约束系数. 约束系数是反映焊缝附近区域对焊接构件的热膨胀、热收缩约束强度的物理量, 又称为约束度. Murakawa 则把固有应变表示成关于最高温度与约束度的函数, 无需假设固有应变分布区域, 通过热传导分析求出最高温度的分布, 从而求出焊接点附近的固有应变分布, 这使固有应变的计算更加精确. Jang 结合 Murakawa 的固有应变计算理论和 Seo 的约束度计算方法及实验结果, 选取杆-弹簧模型, 在各装配阶段计算结构的约束度, 完成了结构形状变化的固有应变计算.

杆-弹簧模型是指把焊接点固有应变区域内的微元取为杆, 周边区域则相当于弹簧, 提供约束. 固有应变的大小由杆的最高温度和约束度决定. 最高温度受焊接输入热量、焊接种类、母材的材料性质等因素的影响, 约束度包括母材的形状、边界条件的影响.

建造船体分段时, 把焊接点附近固有应变区域由方向性分离成纵向及横向两个杆-弹簧模型^[5]. 纵向固有应变 $e_x^*(x, y, z)$ 和横向固有应变 $e_y^*(x, y, z)$ 分别表示最高温度分布 $T_{max}(x, y, z)$ 和纵约束度 b_x 、横约束度 b_y 的函数. 模型如图 2 所示.

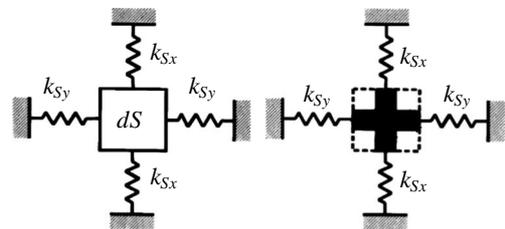


图 2 二维杆-弹簧模型

图 2 中, k_{Sx} 为沿杆纵向的弹簧刚性系数; k_{Sy} 为沿杆横向的弹簧刚性系数.

通过对杆-弹簧模型的热弹-塑性分析可知, 塑性应变会经历如图 3 所示的变化过程.

图 3 中, 横坐标原点为焊接时的初始温度; T_1 为升温过程中杆压缩屈服温度; G 点对应温度为 T_{max} , 是焊接时杆的最高温度; e_Y 为材料的屈服应变.

固有应变区域的总应变和固有应变分别由下式表示:

$$e = e^e + e^p + e^{th} = e^e + e^* \quad (1)$$

$$e^* = e^p + e^{th} \quad (2)$$

式中, e^e 为弹性应变; e^p 为塑性应变; e^{th} 为热应

变； e^* 为固有应变。

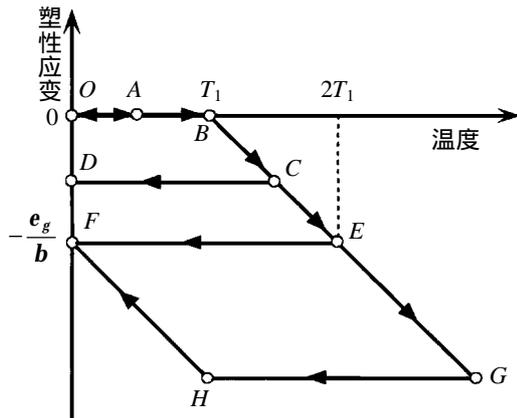


图3 塑性应变随温度变化过程

杆-弹簧模型的杆热膨胀系数、弹性系数及屈服应力都随着温度变化而变化，所以应变也随着温度非线性变化。

知道了最高温度和约束度的分布，才能求出固有应变分布，最终解得等效载荷^[6]。

等效载荷包括沿焊缝垂直方向作用的横向收缩力和横向弯曲力矩，还有作用于两端的纵向收缩力和纵向弯曲力矩。得到等效载荷，即可应用弹性有限元分析对主要焊接变形量—横向收缩，角变形，纵向收缩，纵向弯曲变形等进行计算。

4 结束语

现代化造船工艺要求准确预测各制造分段焊接变形，精确预留反变形。表1列出了分析焊接变形的办法，其中常用的是数值分析法与等效载荷法。比较结果表明，等效载荷法精度可靠且计算量小。随着全新焊接工艺和高效预测方法的应用，船体分段的生产能力必将大大地提高。

表1 焊接变形分析方法比较

方法	实验法	解析法	数值分析法	等效载荷法	
				基于实验	基于固有应变
时代	1930-	1950-	1960-	1980-	1990-
研究手段	测量所需数据，推导参数间关系	固有应变理论，转位论	模拟焊接温度场，边界元、有限元分析。	弹性有限元分析，基于实验数据的等效载荷计算。	弹性有限元分析，基于固有应变的等效载荷计算。
考虑装配顺序	不可能	不可能	可能	不可能	可能
计算特点	需实验数据	需经验及实验数据的积累	跟踪焊接热力学全过程	需实验数据、着重焊后构件变形	着重焊后复杂结构的变形
计算量	小	小	大	小	小

参考文献：

- [1] 孙维善. 船舶焊接[M]. 北京：国防工业出版社，1992.
- [2] [苏]C.A.库兹米诺夫. 船体结构的焊接变形[M]. 北京：国防工业出版社，1978.
- [3] Y.Ueda, H. Murakawa, R.A.Mohamed, et al. Development of computer aided process planning system for plate bending by line-heating (3rd Report) relation between heating condition and deformations [J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan ,1993 ,173:409~419
- [4] 汪建华,陆皓. 焊接预测理论和数值模拟技术的发展[J]. 造船技术，2001 (4)：21~24.
- [5] C.D.Jang, C H Lee and D E Ko. Prediction of welding deformations of stiffened panels[J]. Engineering for the Maritime Environment, Vol. 216(part M): 133~143.
- [6] Seung II Seo, Chang Doo Jang. A study on the prediction of deformation of welded ship structures[J]. Journal of Ship Production ,1999, 15(2): 73~81.

中船集团公司 2005 年度科技进步奖揭晓

经专家评审委员会评审、异议处理等程序，日前，中船集团公司授予 1600 米高速滚装客船等 35 项科技成果“2005 年度科技进步奖”，其中一等奖 7 项，二等奖 11 项，三等奖 17 项。

获得一等奖的民品项目有：广船国际股份有限公司完成的 1600 米高速滚装客船、上海外高桥造船有限公司、七八所联合完成的 15 万吨浮式生产储油船、上海船舶研究设计院、中船黄埔造船有限公司完成的小水线面油田交通船和中国船舶工业综合技术经济研究院完成的国防科技成果信息管理系统（V3.0）等。