

基于 ANSYS 的中厚板焊接有限元三维数值模拟

罗金华 王晓熙 胡伦骥

(华中科技大学材料科学与工程学院)

摘要: 基于大型有限元分析软件 ANSYS, 对中厚板焊接的温度场和应力应变场进行三维数值动态模拟, 并将计算量控制在可接受的范围内. 建模时采用两种单元结合以获得焊缝处细密、远离焊缝处粗略的不均匀网格, 热载荷施加过程中采用余量控制法, 应力应变场的分析采取了一系列非线性措施. 计算结果表明在焊接和冷却过程中角变形沿纵向并不总是线性分布的.

关键词: 焊接; 有限元分析; 数值模拟; ANSYS; 温度场; 应力应变场

中图分类号: TG44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4512(2002)11-0083-04

本研究基于 ANSYS 软件, 用 APDL (ANSYS Parametric Design Language) 进行了二次开发, 考虑重要构件控制变形的需要, 对中厚板焊接的温度场和应力应变场进行三维数值动态模拟, 并控制计算量在可接受的范围内, 以期能将研究成果运用到更为复杂构件焊接过程的数值模拟中.

1 建模

研究 $10.7\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的 D32 钢板. 焊接试验采用 SH507 ϕ 3.2 mm 焊条沿正面中心线进行焊接. 焊接参数为: 焊接电流 $I = 120\text{ A}$, 焊接电压 $U = 25 \sim 26\text{ V}$, 焊接速度 $V = 3\text{ mm/s}$. 试板正面经加工刨平, 反面沿焊缝线钻一个 $\phi 4.5\text{ mm}$ 不同深度的平底孔并焊上铂-铑热电偶用以测量温度. 焊前、焊后通过测量事先布置好的测量杆顶部的跨距变化来测定焊接产生的角变形.

焊接过程是个局部快速加热到高温并随后冷却的过程, 随着热源的移动, 整个焊件的温度随时间和空间急剧变化, 材料热物理性能也随温度剧烈变化, 同时还存在熔化和相变时的潜热现象^[1]. 由于高度非线性及计算量等因素, 因此在对平板堆焊的温度场和应力应变场分析中作以下假设: a. 不考虑工件与实验台之间的热传导, 假设工件的所有外边界仅与空气发生对流换热, 将辐射换热的影响折算到对流换热中, 而不单独考

虑; b. 忽略熔池内部的化学反应和搅拌、对流等现象; c. 忽略焊条与母材材料的不一致性, 采用随温度变化的热物性参数; d. 工件的初始温度为室温 ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$); e. 焊接以恒定速度 V 进行, 电弧的能量密度服从高斯分布.

有限元模型是真实系统的数值模型. 确定单元类型、材料特性、几何模型以及网格划分都是温度场分析和应力应变场分析中的关键环节. 本研究采用文献[2]中的材料热物理性能参数, 分析中应用间接耦合场法, 下面只讨论建模中单元类型和网格划分方案的确定.

1.1 定义单元类型

焊接过程是个热力耦合的过程, 在热弹塑性分析的过程中, 既需要计算温度场, 又需要计算应力应变场, 选择的单元必须是自由度为温度的热单元, 具有热传导、对流能力 (有的单元仅有辐射、对流功能), 而且必须能够进行热力耦合分析. 在本课题中, 研究的是中厚板焊接过程的应力应变场, 必须考察板内厚度方向的温度和应力应变分布, 因此采用三维单元. 此外, 考察的是整个焊接过程的温度场和应力应变场的发展过程, 因此采用能够进行瞬态非线性分析的单元类型.

在此研究的是平板堆焊, 由以上几条原则, 最终可把选用单元的范围缩小为 ANSYS 单元类型库中的 8 节点三维热实体单元 solid70 和 20 节点的三维热实体单元 solid90^[3]. 为了保证焊接熔池

收稿日期: 2002-06-03.

作者简介: 罗金华 (1962-), 男, 博士研究生; 武汉, 华中科技大学材料科学与工程学院 (430074). 现工作单位: 武昌造船厂 (430070).

基金项目: 国防科技预研基金资助项目.

处的计算精度并控制适当的计算工作量,模型的不同区域采用不同的单元,在焊缝和远离焊缝的区域用 solid70,中间部分用 solid90 单元过渡.整个模型单元数为 6 355,节点数为 8 104,不会出现网格过渡错误,计算量也可以接受.

另一项节省计算时间的措施是转变退化四面体单元.用 solid90 的目的是为了生成过渡的金字塔单元,在生成过渡的金字塔后,可将模型中的 20 节点退化四面体单元 solid90 转化为相应的 10 节点非退化单元 solid87,这可使每个单元所需的随机存储单元(RAM)更少^[4].

1.2 网格划分方案

自由网格对于单元形状无限制,但排列不规则.而映射网格对包含的单元形状有限制,而且必须满足特定的规则.映射面网格包含四边形或三角形单元,而映射体网格只包含六面体单元.而且,映射网格具有规则形状,是明显成排的单元^[5],这对载荷的施加和收敛的控制往往是有利的,因此在焊缝处采用六面体网格.

出于提高计算效率的考虑,在远离焊缝处应采用较焊缝处粗略的网格.若全部采用六面体网格,则由于六面体网格的局限性,焊缝处网格的细化只能发生在平板的宽度和厚度方向,而长度方向(焊接方向)不能细化.故需考虑在焊缝和远离焊缝的区域分别用不同大小的六面体网格划分,中间部分用四面体自由网格过渡.但有限元方法要求单元网格相似,在同一网格中混用六面体和四面体的单元会导致不协调,所以把工件分为三个体,即焊缝区、远离焊缝的区域和中间体.两边分别用六面体映射网格划分,中间体用自由四面体网格来过渡.在四面体网格和六面体网格之间还会生成金字塔单元的过渡.另外,出于热载荷移动的要求,针对采用的参数输入方法,自动控制网格大小等于或尽量接近焊缝总长的整数分之一,在一定程度上解决了模拟焊接热源移动中加载不均的问题.

2 温度场分析

为了保证施焊过程中焊缝严格处于试板中心,在试板中心线处开有 1 mm 深的浅槽作为施焊标识.处理潜热问题的方法是定义了不同温度下的热焓,当某一节点温度跨过熔点或相变点时,会有一定的焓变,通过定义这个焓变值就可以考虑熔化潜热.

2.1 热源模型

考虑到工件的中心线处开了一条深 1 mm 的浅坡口作为施焊标识,采用图 1 所示的热源模型.图中,标注为 1,2,3,4 的区域的热流密度按照表面高斯热源的公式分别算出.

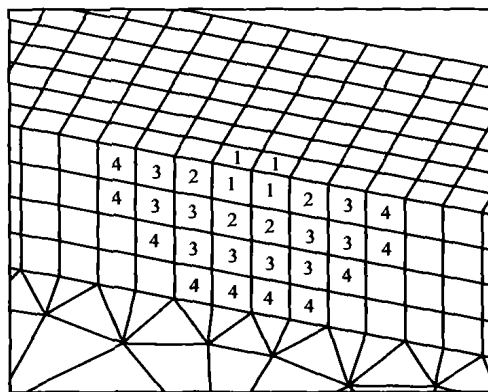


图 1 表面圆形热源与厚度方向热源相结合示意图

2.2 热源的加载

移动载荷的实现需要在求解的时候确定每时刻的载荷的位置和大小,载荷移动到下一个载荷步的时候,上一个载荷步的载荷被去掉,本研究用对流边界条件把上一个载荷步中施加的热流密度覆盖.对于热源一直在移动的焊接过程模拟,热载荷的施加需要用 APDL 编程来实现,即用循环语句来把每一个载荷步的求解文件写入,最后求解的时候再依次读出每个载荷步求解文件.热载荷所施加的平面的最小单元实际上是由节点组成的六面体单元的面.实际操作中,在初始点减去一个余量,在终点加上一个余量,能够保证起点和终点之间的节点被相对精确地选定.这个余量的选择,取决于载荷步的步数和焊缝处网格的大小.此措施称为余量控制法,采用余量控制法可以保证根据坐标来选择节点的精确性.

根据焊接热循环的特征,加热阶段和冷却初期的温度变化剧烈,而冷却到低温时温度变化缓慢,因此采用变步长处理.具体步骤为:a. 以定步长或粗略的变步长计算温度场;b. 根据温度场的结果来判断温度梯度最大(即温度变化最快)的时刻、地点;c. 在温度梯度最大的时刻采用变步长;d. 以变步长计算温度场;e. 根据温度场的结果继续优化;f. 用确定的变步长继续进行结构分析;g. 检查结果,若还是有发散问题,则适当增加该时间段的子步数.

3 应力应变场分析

焊接过程的计算机模拟中,应力应变场的分

析是基于温度场分析的,即通过把第一次场分析的结果作为第二次场分析的载荷来实现两种场的耦合,进行热分析之后,再重新进入前处理,将热单元转换为相应的结构单元。

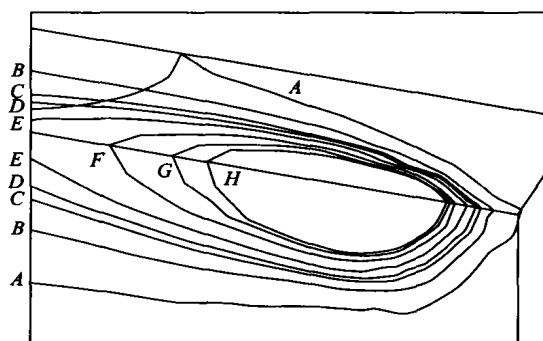
在焊接过程应力应变场的有限元模拟中,由于焊接时的局部快速热循环、热力耦合的不可忽略以及所包含的塑性、有限变形等非线性因素,使得要保证求解精度和解的收敛性有一定困难^[5]。

本研究采用的非线性措施有:激活大应变效应;缓慢加载(使用许多子步)到最终的载荷值;采用修正的牛顿-拉弗森迭代方法;打开自动时间步长,激活二分法,但限制了最小时间步长;应用预测。以上非线性措施在 ANSYS 中都可直接实现。初始阶段平板是处于自由状态的,建模中它没有任何受力和位移,当分析这样一个在奇异(零刚度)形状开始的结构时,必须要人为抑制模型响应中的发散,最后在焊缝下底面中间点施加约束以防止整体刚性位移。

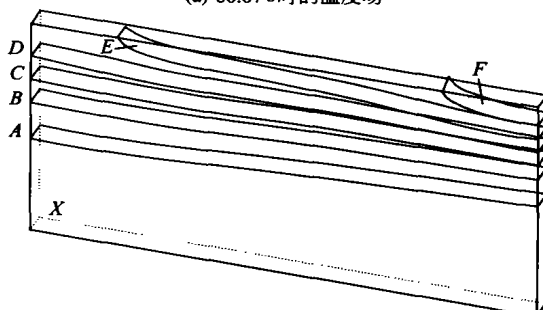
4 求解结果

4.1 温度场求解结果

如图2所示,焊接在66.67s时结束,计算持



(a) 66.67 s 时的温度场



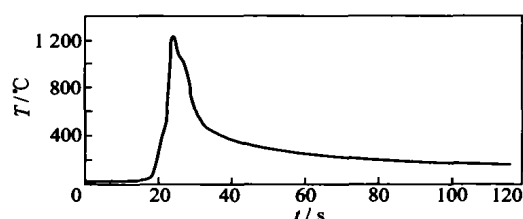
(b) 146.67 s 时的温度场

图 2 各个时刻的温度场

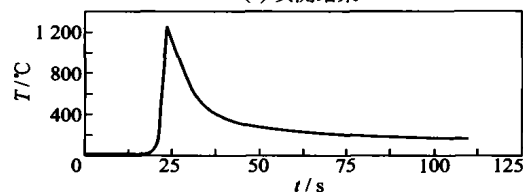
(a) A-200℃, B-400℃, C-600℃, D-700℃, E-900℃, F-1200℃, G-1400℃, H-1500℃; (b) A-32℃, B-56℃, C-80℃, D-105℃, E-128℃, F-153℃

续到冷却至 146.67 s 时温度场的情况。随着电弧的向前移动,温度场发生变化,熔池也随电弧一起移动。在试板的中间部分,电弧作用区域附近的温度场分布基本达到平衡,等温线分布如图 2(a)所示,计算结果符合平板堆焊温度场的一般规律。另外,如图 2(b)所示,冷却到 146.67 s 时,等温线逐渐趋向与焊缝平行,表明沿纵向的温度梯度较小,沿横向的温度梯度相对较大,这也符合残余应力应变沿纵向的分布相对较均匀的现象。

图 3 为熔池以下位置(离上表面距离为 2.7 mm)实测的热循环曲线和计算所得的焊接热循环曲线。计算的最高温度与实测结果几乎相同,计算所得的冷却速度比实测稍快,二者基本符合。



(a) 实测结果



(b) 计算结果

图 3 焊缝底部(离上表面距离 2.7 mm)的热循环曲线

4.2 焊接变形求解结果

图 4 为工件冷却到 146.67 s 的变形结果示意图,主要的变形是角变形。实测的角变形与有限元计算的 146.67 s 时的角变形比较见表 1。表 1 中的截面 1、截面 2 和截面 3 分别为距离焊接起点 20 mm, 100 mm 和 180 mm 的横截面。

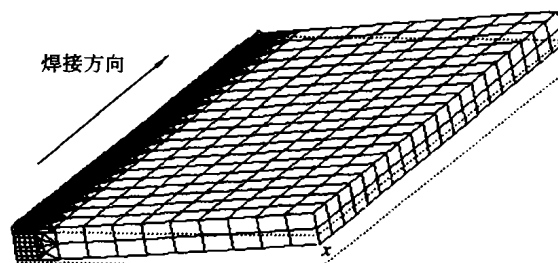


图 4 焊后冷至 146.67 s 时的变形示意图

在施焊加热中,沿焊缝长度方向的角变形是逐步减小的,即左下角的角变形最大。而在冷却过

表 1 角变形实测值与有限元计算值比较

	截面 1	截面 2	截面 3
实测值/rad	0.019 93	0.012 51	0.022 68
计算值/rad	0.012 80	0.011 81	0.016 20

程中,厚度方向的位移都增大,但是沿焊接方向各点的增大速度不一样,角变形慢慢发展为沿焊缝长度方向增加,即右下角的角变形最大.值得注意的是,在整个变化过程当中,等位移线都是弧线.这意味着,在施焊和冷却过程中,平板会发生沿纵向的挠曲变形.在平板边缘的角变形是沿着焊接方向逐渐变大的,而在焊缝附近则可能由于挠曲,会发生焊接起点和终点的角变形较大,而中间部分角变形较小的情况.

参 考 文 献

[1] 汪建华,戚新海,钟小敏.三维瞬态焊接温度场的有限

元模拟.上海交通大学学报,1996,30(3):120~125

[2] 鹿安理,史清宇,赵海燕等.厚板焊接过程温度场、应力场的三维有限元数值模拟.中国机械工程,2001,12(2):183~186

[3] ANSYS Inc. ANSYS elements reference. Twelfth Edition. Canonsburg: SAS IP Inc., 2001.

[4] ANSYS Inc. ANSYS modeling and meshing guide. Twelfth Edition. Canonsburg: SAS IP Inc., 2001.

[5] 倪强,王乘,黄玉盈等.焊接过程的耦合三维热弹塑性有限元分析.华中理工大学学报,1997,25(1):84~85

Numerical simulation of welding of mid-thick plates based with three-dimensional finite element on ANSYS

Luo Jinhua Wang Xiaoxi Hu Lunji

Abstract: Based on ANSYS, three-dimensional finite element numerical dynamic simulation of welding of mid-thick plates was carried out. The amount of calculation was controlled within the acceptable range. Two kinds of elements were combined to get the uneven grids of meshes. During the loading history, the overmeasure was controlled to ensure the precision of nodes selection. For the analysis of stress and strain fields, a series of nonlinear measures were adopted. From the simulation results the development of angular deformation in the heating and cooling process was discovered.

Key words: welding; finite element analysis; numerical simulation; ANSYS; temperature field; stress and strain field

Luo Jinhua Doctoral Candidate; College of Materials Sci. & Eng., Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China.

(上接第70页)

[2] 王珊,陈红.数据库系统原理教程.北京:清华大学出版社,1998.

[3] 刘胜利.新型电冰箱故障诊断维修方法200例.北京:高等教育出版社,1999.

[4] 张华俊.电冰箱和冷柜的原理、选用与维修.西安:西安电子科技大学出版社,1998.

Information system for fault diagnosis of refrigerator based on Web

Liu Bingquan Wang Hong Xiao Biao Zhou Yongping

Abstract: Using Visual Basic and SQL Server, the authors designed the information system for fault diagnosis of refrigerator based on Web. The individual function module and the corporation function module were presented in this system. The MDI technology of Visual Basic 6.0 in the course of design was used in order to keep the consistency of system style. With the help of disperse column view and form view, the result gather of data base was disposed. Through the remote data objects technology, the link between application and data base was established. Users could learn the knowledge of the fault diagnosis and make the principal diagnosis according to the phenomenon of fault.

Key words: information system; fault diagnosis; refrigerator; Browser/Client/Server

Liu Bingquan Postgraduate; College of Energy & Power Eng., Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China.