

堆焊角变形动态过程试验与数值分析

刘川, 王蕊, 张建勋

(西安交通大学材料科学与工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用有限元数值模拟方法研究了 CO_2 气体保护堆焊的角变形动态过程. 为了反映夹具和焊接件的接触状态, 将夹具和焊件统一建立有限元模型. 对计算焊接角变形的接触约束二维模型、位移约束二维模型和位移约束三维模型进行了比较, 并与试验结果进行了对比分析. 研究表明: 虽然二维模型不能反映焊接角变形的动态过程, 但能得到和试验结果一致的残余角变形; 三维模型能反映焊接过程中的动态角变形, 但计算效率低; 接触约束模型能计算出焊接件在夹具作用下的摩擦力和接触压力.

关键词: 焊接; 角变形; 数值模拟; 有限元

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-1017-05

Numerical Simulation and Testing of Dynamic Welding Angular Distortion for Overlayer

Liu Chuan, Wang Rui, Zhang Jianxun

(School of Material Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The contact between welding plate and fixture is treated as constraint in the finite element model of dynamic welding angular distortion simulation for overlayer in CO_2 gas arc welding. The simulated results of 2D model with contact constraint, 2D model with displacement constraint, and 3D model with displacement constraint are comparatively analyzed with the experiment. The results show that the simulated results of 2D models do not correspond to the dynamic distortion of the welding plate, while the calculated residual distortion is close to the experimental result; a good agreement between the simulated result of 3D model and the measured one is observed with a long computing period. The friction stress and contact pressure between the welding plate and the fixture can be evaluated during welding with the contact model.

Keywords: welding; angular distortion; numerical simulation; finite element

焊接过程由于高度集中的瞬时热输入导致不均匀的加热和冷却, 使得焊缝及其附近金属产生非均匀膨胀和收缩, 从而引起焊接残余应力和各类焊接变形. 焊接残余应力的存在易导致焊接裂纹和接头强度与性能的降低, 焊接变形则影响结构的制造精度和使用性能^[1], 因而控制焊接变形是焊接加工中的一个关键任务. 研究焊接变形的产生机理以便对焊接变形进行预测和控制, 一直是工程技术人员和学者关注的热点, 但由于焊接中各种物理参数及它

们之间的相互影响, 以及焊接时的各种外在拘束力(如夹具等)对焊接件变形影响很大, 使得焊接变形难以预测和控制.

随着计算机技术的发展, 有限元方法成为焊接应力和变形数值分析的重要手段之一. 因为二维有限元模型计算效率高, 因此很多学者都采用二维模型来研究焊接变形及其影响因素, 例如: Ueda 等人采用二维有限元模型研究了局部加热、焊接顺序、初始应力、焊接间隙等因素对焊接变形的影响^[2-3];

Michaleris 等人采用二维模型计算焊接应力,将二维焊接残余应力作为负载施加在三维结构上来研究大型结构的焊接失稳变形^[4],并研究了控制焊接变形的热拉伸技术^[5];Zhu 等人采用二维模型研究了材料属性对焊接变形的影响^[6];Teng 等人用二维模型研究了 T 型焊接件的变形^[7].也有人用三维有限元模型对焊接变形进行数值模拟^[8-10].Abid 等人采用三维和二维有限元模型对管-法兰盘接头的焊接变形和残余应力进行了分析,并比较了三维和二维模型各自的优缺点^[11-12].

对于夹具与焊接件的相互作用,多数计算模型采用位移约束进行简化,但是这样的简化模型不能计算夹紧压力和支撑力的大小,因而不能优化夹具作用位置和夹紧力,而这对于精密焊接是非常重要的.本文将夹具与焊接件的接触关系作为约束,建立了表面堆焊焊接角变形二维有限元计算模型,与位移约束二维平面模型和三维模型进行了比较,并通过焊接动态变形试验进行了验证.

1 试验装置和过程

采用机器人自动 CO₂ 气体保护焊接方法,在低碳钢试板表面进行单道堆焊.焊接工艺参数为:电流 221 A,电压 23.9 V,焊接速度 70 cm/min.用热电偶测量试板底部的温度变化,用位移传感器测量焊接过程中的动态变形.试验装置如图 1 所示.试板的尺寸、焊接位置、温度测量点和变形测量点如图 2 所示,所有的位移和温度测量点都在试板底面.



图 1 试验装置

2 有限元计算模型

2.1 计算模型

试板和压板、支撑板之间的接触关系是对试板的一种约束.根据几何模型和约束方式不同,本文比较了 3 种计算模型:位移约束二维模型;接触约束二维模型;位移约束三维模型.取垂直于焊缝的中截面位置建立二维模型,位移约束时,将模型中与压板和

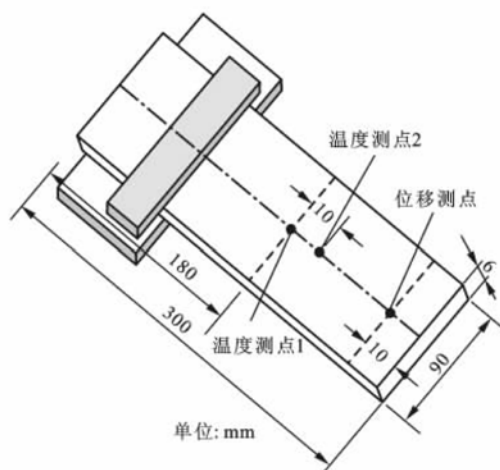


图 2 温度和位移测量点示意图

支撑板接触的所有节点的位移自由度设置为 0.对于接触约束情况的二维模型,将压板、支撑板和试板统一建模,考虑试板的重力,以及压板和试板、支撑板和试板的相互作用,在压板上表面施加 1 MPa 的夹紧压力.假设压板和试板都是可变形体,两者的接触方式为面-面、柔性-柔性接触;假设支撑板为刚性体,试板和支撑板的接触方式是面-面、刚性-柔性接触,刚性体支撑板的所有位移自由度为 0.试板和压板、试板和支撑板之间的摩擦系数设为 0.3.

三维模型的约束方式是位移约束,将三维模型上与压板和支撑板接触的所有节点的位移自由度设置为 0.三种模型的示意图如图 3 所示.

试板材料为低碳钢,采用文献^[4]中的材料属性进行计算,材料的物性参数随温度变化,且服从 Mises 屈服准则.

用 4 节点四面体单元对二维模型划分网格,用 8 节点六面体单元对三维模型划分网格.划分网格时,在焊接位置细化网格.由于三维模型计算非常耗时,因此对三维模型的网格划分和计算输出进行控制,尽可能地减少单元数和计算时间.3 种模型划分网格后的单元数见表 1.

表 1 3 种模型的单元数

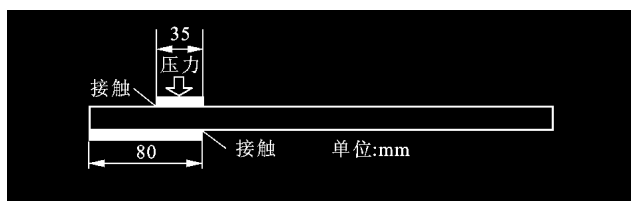
模型	约束方式	尺寸	单元数
二维	位移约束	300 mm×6 mm	1 494
二维	接触约束	300 mm×6 mm	1 977
三维	位移约束	300 mm×90 mm×6 mm	6 000

2.2 热源模型

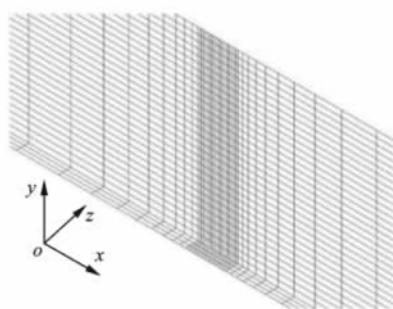
因为是表面堆焊,所以采用高斯表面热源加载.



(a)位移约束二维模型



(b)接触约束二维模型



(c)位移约束三维模型

图3 3种计算模型示意图

加载在三维模型上的热源表达式为

$$q(x, y) = \frac{3Q}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{3x^2}{r^2}\right) \exp\left(-\frac{3y^2}{r^2}\right) \quad (1)$$

式中: $Q = \eta UI$ 为电弧功率, 其中 η 为电弧效率, U 为焊接电压, I 为焊接电流; r 为电弧作用半径。

二维模型只是取垂直于焊缝的中截面建模, 在焊接方向上(图3c中 y 向)的电弧热流分布可以通过焊接速度和时间来表示。加载在二维模型上的高斯表面热源表达式为

$$q(x, t) = \frac{3Q}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{3x^2}{r^2}\right) \exp\left(-\frac{3(v(t-\tau))^2}{r^2}\right) \quad (2)$$

式中: v 为焊接速度; τ 为决定 $t=0$ 时刻热源位置的滞后时间因素。

3 计算结果及讨论

3.1 温度计算结果

计算和试验测量的试板底部温度测点1、2(见图2)的温度曲线如图4所示, 焊缝熔化区和热影响区的宏观形貌及温度场分布图如图5所示。

从图4中可以看出, 试板温度测点1、2的模拟

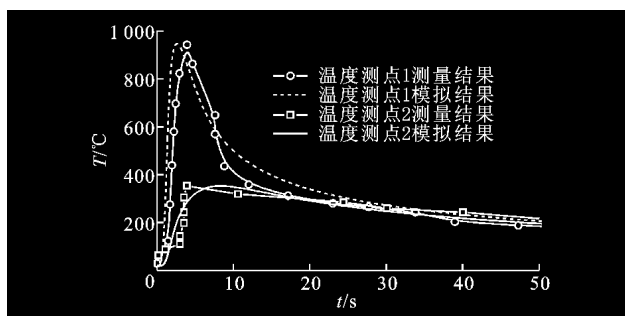


图4 试板底部温度测量点的温度曲线

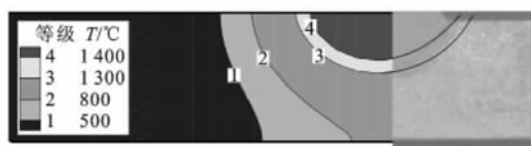


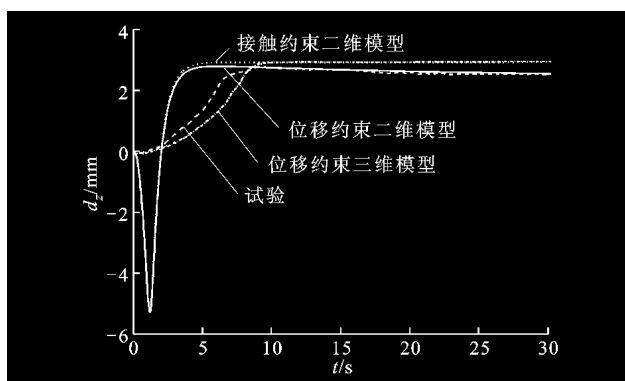
图5 温度场分布及焊缝形貌图

和测量温度循环曲线相近。从图5中可以看出, 计算的温度场结果和焊缝断面形貌的分布很相似, 说明温度场计算结果相当准确。

3.2 位移计算结果

将温度场作为负载来计算焊接变形场。温度场和变形场的总计算时间, 位移约束二维模型为2.5 h, 接触约束二维模型为3.5 h, 位移约束三维模型为10 h, 三维模型的计算时间是二维模型的3~4倍。

试板的角变形可以通过试板边缘上一点的垂直方向(图3中 z 向)位移来表示。不同模型计算得到的位移测点(见图2)的 z 向位移(d_z)曲线和试验测量结果的比较如图6所示。

图6 位移测点的 z 向位移曲线

在图6中, 采用位移约束三维模型计算得到的位移测点的 z 向位移曲线和试验结果相近, 能够准确地反映焊接过程中的动态变形。焊接开始时, 研究点就开始缓慢上翘, 焊接结束后, 研究点的上翘量很

快达到一个恒定值。

采用位移约束二维模型进行计算时,在加热阶段的变形计算值远远大于测量值,而残余变形的计算值与测量结果符合较好。这是由于在加热阶段,只是局部区域受热,受热部位的膨胀要受到未加热区域的制约(拘束作用),因而试验测量得到的加热阶段变形小,而二维模型只是以一个横截面建立模型,不能考虑到未受热区域对该截面的拘束,因而出现计算结果比试验测量值大的情况。当焊接结束时,尽管焊缝各处是不同时刻加热的,但因焊接时间短(7.8 s),焊缝各处的温差小,因此焊缝处的温度相对于其他区域处于高温,整个焊缝可以看作是整体冷却,相互之间的收缩制约作用小,垂直于焊缝的各个截面的冷却收缩效果基本一致。因此,只考虑与焊缝垂直截面的二维模型的残余变形计算值不受其他截面的影响或受影响不大,故残余变形计算值和测量值符合较好。

接触约束二维模型的计算结果和位移约束二维模型的结果相近,加热阶段的变形计算值远大于试验测量值,但残余变形和试验测量结果相符。因为试验中的支撑板和压板距离焊缝较远,夹具位置对变形的影响较小,因而采用位移约束和接触约束计算得到的结果相近。

3.3 试板上的接触压力和摩擦力

试板在焊接过程中的膨胀和收缩变形,必然影响到压板和支撑板对试板的作用力,其中试板受到的摩擦力和接触压力影响试板的变形和应力分布。接触约束二维模型由于考虑了压板和支撑板对试板的作用,因此试板所受的接触压力和摩擦力能够计算出来。接触约束二维模型加热 1.8 s 时(升温终了时刻)试板下表面的摩擦应力和接触压力分布分别见图 7 和图 8。

从图7中可以看出,试板下表面所受的摩擦力

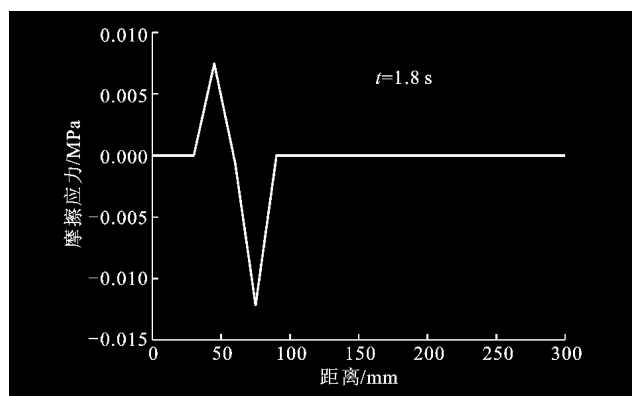


图7 接触约束时试板下表面的摩擦应力

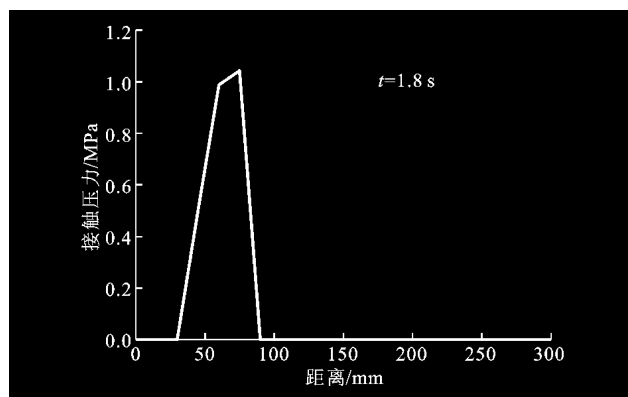


图8 接触约束时试板下表面的接触压力

在压板作用长度上的分布是不均匀的,说明试板在加热阶段的变形比较复杂,由于热源远离夹紧位置,故试板的摩擦应力值很小,最大不超过 0.015 MPa。

从图 8 中可以看出,试板下表面的接触压力分布也是不均匀的,接触压力从 0 增加到 1 MPa 以上(压板上施加的压力值为 1 MPa),然后又减小至 0。

4 结 论

本文采用有限元数值模拟方法研究了 CO_2 气体保护堆焊的角变形动态过程,对计算焊接角变形的接触约束二维模型、位移约束二维模型和位移约束三维模型进行了比较,并与试验结果进行了对比分析,研究结论如下。

(1)在有限元建模中,将夹具和焊接件统一建模能够反映夹具和焊接件的接触状态。

(2)可以利用二维模型预测残余焊接角变形。虽然二维模型不能反映焊接角变形的动态过程,但计算得到的残余焊接角变形和试验结果基本一致。

(3)利用三维模型能反映焊接过程中的动态角变形,但计算效率低,计算时间是二维模型的 3~4 倍。

(4)接触约束模型能够计算出焊接件在夹具作用下的摩擦力和接触压力,这有助于进行精密焊接和焊接夹具的优化。

参考文献:

- [1] Cui Weicheng, Mansour A E. Effects of welding distortions and residual stresses on the ultimate strength of long rectangular plates under uniaxial compression [J]. Marine Structures, 1998, 11(6): 251-269.
- [2] Ueda Y, Murakawa H, Gu S M, et al. Simulation of welding deformation for precision ship assembling (I) — in-plane deformation of butt welded plate [J].

- Trans of JWRI, 1992, 21(2): 265-275.
- [3] Ueda Y, Murakawa H, Gu S M, et al. Simulation of welding deformation for precision ship assembling (II) — influence of initial geometrical imperfection on butt welded plate [J]. Trans of JWRI, 1993, 22(1): 135-144.
- [4] Michaleris P, DeBicari A. Prediction of welding distortion [J]. Welding Journal, 1997, 76(4): 172-181.
- [5] Michaleris P, Sun X. Finite element analysis of thermal tensioning techniques mitigating weld buckling distortion [J]. Welding Journal, 1997, 76(11): 451-457.
- [6] Zhu X K, Chao Y J. Effect of temperature-dependent material properties on welding simulation [J]. Computers and Structures, 2002, 80: 967-976.
- [7] Teng Tso-Liang, Fung Chin-Ping, Chang Peng-Hsiang, et al. Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2001, 78(8): 523-538.
- [8] Tsirkas S A, Papanikos P, Pericleous K, et al. Evaluation of distortions in laser welded shipbuilding parts using local-global finite element approach [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8(2): 79-88.
- [9] Dhingra A K, Murphy C L. Numerical simulation of welding-induced distortion in thin-walled structures [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(5): 528-536.
- [10] Shirai H, Urushizaki M, Sawamoto S, et al. Analysis of bending deformation behaviour during circumferential welding of cylindrical parts: study of deformation behaviour at micron to sub-micron level of laser-welded automotive parts [J]. Welding International, 2004, 18(8): 626-634.
- [11] Abid M, Siddique M, Mufti R A. Prediction of welding distortions and residual stresses in a pipe-flange joint using the finite element technique [J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2005, 13(3): 455-470.
- [12] Abid M, Siddique M. Numerical simulation to study the effect of tack welds and root gap on welding deformations and residual stresses of a pipe-flange joint [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2005, 82(11): 860-871.

(编辑 葛赵青)

能源与动力工程学院举行“111 引智计划”首场报告会

2007年6月28日,教育部“高等学校学科创新引智计划”(简称“111 引智计划”)资助项目、我校“能源高效与再生利用的热物理科学创新引智基地”的首场报告会举行。4位基地团队海外杰出人才——美国迈阿密大学的刘洪潭教授、美国普渡大学卡鲁梅特分校的周谦教授、香港科技大学的赵天寿教授、美国阿克伦大学的王国祥教授,与我校的3位基地团队国内学术带头人——郭烈锦教授、何雅玲教授和黄佐华教授,围绕困扰我国能源可持续发展的关键理论问题,为能动学院师生带来了一场学术盛宴。据了解,“111 引智计划”是国家外国专家局与教育部联合开展的“高等学校学科创新引智计划”项目,该项目意在促进高等学校重点学科和优势学科建设,全面提升高等学校科技创新能力和综合竞争实力。由我校动力工程多相流国家重点实验室郭烈锦教授负责的“能源高效与再生利用的热物理科学创新引智基地”,是2007年度“111 引智计划”建设项目,共获得600万元国拨经费资助,计划在3~5年内凝聚国内外优秀人才,形成科技创新研究团队,加强实验室在节能与能源可再生转化利用国际学术领域内的优势,提升整体研究水平,建设国家级科技创新平台,通过基地研究形成国际一流的多相流理论成果和自主知识产权的能源核心技术。

目前,包括“能源高效与再生利用的热物理科学创新引智基地”在内,我校共有3个引智基地获准进入“111 引智计划”,引智基地立项总数在全国高校名列前茅。这些具有原始创新能力的学科创新引智基地,为我校汇聚了一批世界一流人才,促进了高层次海外人才与我校科研骨干的融合,在开展高水平合作研究和学术交流方面发挥了积极作用。

(来源:交大新闻网)