焊接数值模拟技术发展现状

吴言高[1]， 李午申[1]， 邹宏军[2]， 冯灵芝[1]
（1. 天津大学 材料科学与工程学院，天津 300072；2. 攀钢集团钢城企业总公司协力公司，四川 攀枝花 617000）

摘 要：焊接是一复杂的物理化学过程，借助计算机技术，对焊接现象进行数值模拟，是国内外焊接工作者的热门研究课题，并得到了越来越广泛的应用。概括介绍了数值模拟技术的概念及分析方法和焊接数值模拟的主要内容及意义，综述了国内外焊接数值模拟在热过程分析、冶金分析、应力应变分析、构件使用性能分析、氢扩散分析、特种焊接过程分析方面的研究现状及发展趋势，对我国焊接数值模拟技术的发展提出了建议。

关键词：焊接；数值模拟；研究现状
中图分类号：TG40 文献标识码：A 文章编号：0253－360X(2002)03－89－04

吴言高

0 序 言

焊接是一个涉及电弧物理、传质传热、冶金和力学的复杂过程，单纯采用理论方法，很难准确的解决生产实际问题。因此，在研究焊接生产技术时，往往采用试验手段作为基本方法，其模式为“理论－试验－生产”，但大量的焊接试验增加了生产的成本，且费时费力。随着计算机软硬件技术的快速发展，引发了虚拟制造技术的热潮，这其中就包括焊接热加工过程的数值模拟。焊接数值模拟技术的出现，为焊接生产朝“理论－数值模拟－生产”模式的发展创造了条件。焊接数值模拟技术的发展使焊接技术正在发生着由经验到科学、由定性到定量的飞跃。

1 焊接数值模拟基础

1.1 焊接数值模拟概念

焊接数值模拟，是以试验为基础，采用一组控制方程来描述一个焊接过程或一个焊接过程的某一个方面，采用分析或数值方法求解以获得该过程的定量认识（如焊接温度场、焊接热循环、焊接 HAZ 的硬度、焊接区的强度、断裂韧性等）。焊接数值模拟的关键是确定被研究对象的物理模型及其控制方程（本构关系）。而焊接物理模拟是采用缩小比例或简化了某些条件的模拟件来代替原尺寸形状的实物研究（如焊接热/力物理模拟、密栅云纹法分析应力应变、氢的瞬态分布电视录象）。物理模拟可以校验、校核数值模拟的结果，作为数值模拟的必要补充。

收稿日期：2001－12－26

1.2 焊接数值模拟中的数值分析方法

数值模拟是对具体对象抽取数学模型，然后用数值分析方法，通过计算机求解。经过几十年的发展，开发了许多不同的科学方法，其中有：(1)解析法，即数值积分法；(2)蒙特卡洛法；(3)差分法；(4)有限元法。

数值积分法用在原函数难于找到的微积分计算中。常用的数值积分法有梯形公式、辛普生公式，高斯求积法等。

蒙特卡洛法又称随机模拟法。即对某一问题做出一个适当的随机过程，把随机过程的参数用由随机样本计算出的统计量的值来估计，从而由这个参数找出最初所述问题中的所含未知量。

差分法的基础是用差商代替微商，相应的就把微分方程变为差分方程来求解。差分法的主要优点是对于具有规则的几何特性和均匀的材料特性问题，其程序设计和计算简单，易于掌握理解，但这种方法往往局限于规则的差分网格，不够灵活。在焊接研究中差分法常用于焊接热传导、熔池流体力学、氢扩散等问题的分析。

有限元法起源于 20 世纪 50 年代航空工程中飞机结构的矩阵分析，现在它已被用来求解几乎所有的连续介质和场的问题。在焊接领域，有限元法已经广泛的用于焊接热传导、焊接热弹塑性应力和变形分析、焊接结构的断裂力学分析等。

在工程应用中，上述数值方法常相互交叉和渗透。

1.3 焊接数值模拟的内容

焊接数值模拟包括以几个下方面：(1) 焊接热过程的数值模拟；(2)焊接熔池液体流动及形状尺

寸的数值模拟;(3) 焊缝金属凝固和焊接接头相变过程的数值模拟;(4) 焊接应力和应变发展过程的数值模拟;(5) 非均匀焊接接头的力学行为的数值模拟;(6) 焊接接头组织变化和热影响区氢扩散的数值模拟;(7) 焊接结构断裂韧性、疲劳裂纹扩展的数值模拟。

1.4 焊接数值模拟的意义

焊接数值模拟的理论意义在于,通过对复杂或不可观察的现象进行定量分析和对极端情况下尚不知的规则的推测和预测,实现对复杂焊接现象的模拟,以助于认清焊接现象本质,弄清焊接过程规律。

焊接数值模拟的现实意义在于,根据对焊接现象和过程的数值模拟,可以优化结构设计和工艺设计,从而减少试验工作量,提高焊接接头的质量。

2 焊接数值模拟在国内外发展研究现状

1962 年,丹麦人首次用计算机有限差分法进行铸件凝固过程的传热计算,进入 70 年代,更多的国家加入到这个研究行列,并从铸造逐步扩展到锻压、热处理、焊接。我国焊接界数值模拟研究起步于 80 年代初,近年来很多的科研单位和个人投入到了这项研究中,并取得了积极的进展。

2.1 焊接热过程分析

焊接热过程分析包括焊接热源的大小和分布形式分析、热物理性能随温度变化的影响分析,焊接熔池中的流体动力学和传热分析,焊接电弧的传热传质分析,以及各种实际焊接接头形式、焊接程序、焊接工艺方法的边界条件处理等。利用数值方法计算焊接热过程,为合理选择焊接方法和工艺参数以及进一步进行冶金分析和动态应力应变分析奠定了基础。

焊接热过程的数值分析开始于 20 世纪 70 年代。1985 年樊丁和 M. Ushio 在假定电流为高斯分布的条件下,计算了电弧的压力场分布规律,建立了较完善的电弧传热传质数值模型[1];J. J. Lowke 采用了一个统一的电弧-电极处理系统对 GTAW 和 GMAW 焊接时电极的温度进行了数值预测,该二维模型可在任何给定电流、焊接气体和电极形状下进行分析[2]。

文献[3] 首次将电弧看作辐射状并呈高斯分布的二维热流作用于工件表面,解决了电弧产热问题;通过淬液法测试金属的固相分数随温度变化率,得到凝固潜热释放率;采用增大热传导系数的方法并考虑熔池内流体流动对整个温度场的影响,建立了二维焊接凝固裂纹温度场计算模型。文献[4] 在 ADINA &T 的基础上,建立了包括网格划分、材料性能参数输入和焊接参数输入的输入模块,实现了参数的输入、预览等基本功能;同时编制了时间函数自动生成模块,实现了用时间函数来描述焊接工程中的电弧热输入;设计了单元死活时间自动计算模块,成功的实现了单元"活-死-活"过程,最终形成了可以引导技术人员完成复杂的凝固裂纹数值模拟的自动前处理系统。文献[5] 以 ADINA &T 为中心计算软件,利用 VB6.0 为主要编程语言,借助 MATLAB 及 MatrixVB 矩阵运算函数库,建立了温度场数值模拟后处理系统。该系统通过位置和时间步设置,实现了任意位置和时刻温度场的三维、等高线、横截面、纵截面和循环线的显示。

2.2 焊接冶金分析

焊接过程冶金分析包括焊接熔池中的化学反应和气体吸收、焊缝金属的结晶、溶质的再分配和显微偏析、气孔、夹渣和热裂纹的形成、热影响区在焊接热循环作用下发生的相变和组织性能变化,以及氢扩散和冷裂纹等的预测。为保证接头质量,对焊接冶金过程和焊接接头组织性能的预测、优化,以及对工艺参数的选择是一非常重要的课题。

美国 Oak Ridge 国家试验室的 S. A. David 等人对焊缝金属中显微组织的建模进行了较全面深入的研究,并试图用一个通用和集成的模型来预测焊缝组织的发展,它是焊缝金属成分和焊接参数的函数,适合于任何合金系统[3]。H. Cerjak 等发展了一个综合的计算机程序"HAZ-CACULATOR",提供了大约 50 个冶金计算法,可用于非合金钢、合金结构钢、调质钢、低合金钢、耐热钢与奥氏体不锈钢[2]。关于热影响区的相变和组织性能的预测,最初是根据 SH-CCT 图结合热计算来预测组织和硬度的,随着研究工作的不断深入,开始重视温度、相变和热应力之间的耦合效应。D. F. Watt 和 C. Henwood 等提出了一个预测模型,对焊接热影响区传热和组织变化的耦合进行了研究。

国内在这一领域研究较少。文献[6] 提出了一个焊接 SH-CCT 图的计算机辅助推定模型,利用该模型可以实现给定钢材化学成分,计算机自动制定出焊接 SH-CCT 图。

2.3 焊接应力应变分析

焊接应力与应变数值分析的研究,包括焊接动态的应力应变过程,焊接残余应力和残余变形、拘束度和拘束应力以及消除应力处理等。这对预防焊接裂纹和提高接头的性能有很大益处。

20 世纪 70 年代初,日本的上田幸雄等首先以有限元为基础,提出了考虑材料力学性能与强度有关的热弹塑性分析理论,从而使复杂的动态焊接应

力应变过程的分析成为可能。他的理论成果可以归纳为以下几个方面：(1)焊接热弹塑性基本理论；(2)焊接应力的发生机制和残余应力分布状态；(3)消除应力退火；(4)焊接裂纹及其力学指标；(5)固有应变理论；(6)基于固有应变理论的二维残余应力测定法；(7)高精度焊接变形的预测；(8)焊接应力变形对焊接接头的强度影响等[2]。法国的 J. B. Leblon 对相变时钢的塑性行为进行了理论和数值研究，在研究基础上发展了 SYSWELD 软件；T. Tnouce 等研究了伴有相变的温度变化过程中，温度、相变、热应力三者之间的耦合效应，并提出了在考虑耦合效应的条件下本构方程的一般形式[2]。

文献[7，8] 通过采用单元再生、单元死活方案，消除了焊接构件中熔池变形对熔池尾部应力应变场的影响；通过加大材料线膨胀系数的方法，考虑凝固收缩对熔池尾部应力应变场的影响；通过采用热弹、塑性力学方法处理了固相区的应力应变本构关系，从而建立了一种计算凝固裂纹驱动力的有效方法。文献[9，10] 针对实际结构应力和变形的数值模拟，研究了焊接移动热源、动态可逆的自适应网格技术、焊缝熔敷金属填充的处理、并行计算、材料性能在高温时的处理、降阶积分等关键性问题，提出了相似理论、快速焊接变形实时测量在焊接数值模拟中的应用。文献[11] 利用 ADINA 非线性分析有限元程序，对低碳钢管道环焊缝接头焊接残余应力进行有限元分析。在热弹塑性分析中考虑了材料热物理和力学性能依赖于温度变化。结果表明，在管道接头内表面焊缝中心及近缝区轴向和环向残余应力均为拉应力，随离开焊缝距离的增加，逐渐过渡为压应力；在管道接头外表面焊缝中心处的轴向残余应力为压应力，而环向残余应力为拉应力，计算预测值与实测值基本一致。近年来，文献[9、10] 在焊接结构变形方面进行的广泛研究取得了较大进展，并已应用于三峡 1 200 t 桥式起重机主梁焊接变形的控制和大型挖掘机的工艺设计中。

2.4　焊接结构完整性评定

焊接结构完整性评定包括焊接接头应力分布状态、焊接构件的断裂力学分析、疲劳裂纹的扩展、残余应力对脆断的影响、焊缝金属和热影响区对性能的影响等。其中对焊接接头断裂力学分析的研究最为活跃。

国际焊接学会(IIW)的第 X 分委会近来的研究中心就是对焊接接头断裂韧性的研究。德国 GKSS 的 M. Cocak、日本的 M. Toyoda，F. Minami 等人在这方面做了许多工作。F. Minami 等采用局部近似法(该方法引入 Weibull 应力 σ_w 作为一个可挑选的断裂驱动力)定量研究了不均质焊接接头的断裂阻力，该近似法已用于强度不匹配对断裂韧性结果影响的预测，以及从韧性试验结果到焊接接头断裂使用评价的变换性分析，显示出了优越性。

基于单试样延性断裂韧度的试验确定方法，文献[12] 建立了一种延性断裂韧度统计分布的数值模拟模型，可较好地处理各种非固定因素引起的延性断裂韧度的统计变异性。在计算机上易实现大样本量的模拟、得到较准确的延性断裂韧度的统计分布及其参数，同时还可进行敏感性分析。近年来，上海交通大学开展了广泛的国际合作，在焊接力学数值模拟领域取得了以下主要成果[13]：(1)研究了适合各种焊接热输入条件下的焊接传热有限元分析方法和相应的计算机程序，研究了提高三维焊接热弹塑性有限元计算精度和稳定性的有效方法并在若干三维复杂焊接结构的分析以及失效变形之中得到成功应用；(2)引入考虑高温蠕变的粘弹塑性有限元方法，对局部焊后热处理的评定准则进行了全面研究，提出了新的评定方法；(3)提出和发展了基于弹性计算的预测焊接变形的残余塑变有限元方法，包括采用三维板壳单元和考虑大变形。一些理论成果已经应用于实际工程中，如空调压缩机的焊接变形与应力分析，大型艇体结构的焊接变形预测，600 MW 核电凝气器焊接变形分析等。

2.5　焊接中氢扩散分析

氢是引起高强钢冷裂纹的三大要素之一。焊接氢扩散过程相当复杂，受到接头组织、温度、应力、塑性应变等多种因素影响，因此要寻找它的解析解十分困难。目前数值分析方法已应用于焊接氢的扩散与聚集的研究。

B. Bets 等通过氢扩散和聚集行为的数值分析评价了焊接接头层状撕裂的影响。E. Takahashi[14] 等采用了有限差分法评价了一个多层焊缝中氢的分布，FDM 计算结果与试验测定相当吻合。

文献[15] 采用 ABAQUS 有限元分析软件对氢在不均质焊接接头的扩散进行了数值模拟计算，得到了焊接接头随时间延迟，焊缝金属中氢的浓度逐渐降低，而熔合区以外区域氢的浓度经历了一个峰值变化过程的结论。该结论可用于指导焊接热过程中的工艺制订。

2.6　特种焊接过程分析

H. A. Nied[16] 在 1984 年提出了一个电阻点焊过程的有限元模型。该模型可以用来分析压力和焊接循环，预测温度分布、热膨胀及其应力和熔核的几何尺寸。A. Matsunawa 等提出了一个激光脉冲点焊热传导以及快速熔化和凝固的模型，该模型考虑到了潜热的影

响,可用来选择凝固时合适的热循环,从而减少有裂纹敏感性的合金脉冲激光点焊时的热裂纹倾向[2]。

文献[17]根据相变扩散连接的特殊性,建立了钛/不锈钢相变扩散连接界面区元素扩散、金属间化合物的生长和成长行为的数学模型。文献[18]对PBGA封装制造时钎料球的激光重熔过程中的温度场分布进行了数值模拟,考虑了多点和扫描两种激光加热方式对温度场的影响规律,并将成果成功用于生产中。

3 焊接数值模拟技术的发展趋势及建议

近10年来,焊接数值模拟技术不断向深度、广度发展,研究工作已普遍由建立在温度场、电场、应力应变场基础上的旨在预测宏观尺度的模拟进入到以预测组织、结构、性能为目的的中观尺度及微观尺度的模拟阶段;由单一的温度场、电场、流场、应力应变场、组织模拟进入到耦合集成阶段;由共性通用问题转向难度更大的专用特性问题,包括解决特种焊接模拟及工艺优化问题,解决焊接缺陷消除等问题;由孤立研究转向与生产系统及其它技术环节实现集成,成为先进制造系统的重要组成部分。

经过多年研究,中国已经形成了一批较成熟的准商品化的软件,但与发达国家相比,有较大差距。应尽量以国外成熟商业软件为基础,将改进提高与普及应用相结合,加快数值模拟软件开发。要在工厂及科研单位普及这项技术,使之成为优化工艺设计、科技攻关、技术创新的重要手段;要重视与物理模拟和测试技术的配合使用,提高数值模拟的精度和速度;要加强焊接数值模拟基础理论及缺陷形成原理的研究;要多渠道集资,支持数值模拟研究工作;另外,中国目前的研究工作,有一些已接近或达到国际先进水平,如焊接凝固裂纹精确评价技术及开裂判据、焊接氢致裂纹精确评价技术及开裂判据、金属凝固相区热应力本构方程及模拟仿真、固态相变条件下弹塑性应力应变场分量的理论分析及模拟等。应瞄准目标,集中优势力量,争取做出更大的成绩。

4 结 束 语

到2020年,计算机分析、数值模拟、自动化制造,将在焊接中广泛运用,焊接将彻底转变为一门科学。在焊接技术由经验向科学的转变过程中,焊接工艺过程控制、材料的低功耗、纯净化和智能化以及焊接设备参数复杂控制知识模型的建立是核心任务。随着对焊接过程中各种现象的进一步深入了解以及计算机技术的快速发展,焊接数值模拟技术及进一步发展的虚拟制造技术必将广泛的应用到焊接技术的研究及生产中,极大促进国民经济建设,推动生产制造的科学化、现代化、自动化进程。

参考文献:

[1] Ushio M, Fan D. A method of estimating the space-charge voltage drop for thermionic arc cathodes[J]. J. Phys. D, Appl. Phys., 1994, 27(3): 561~566.

[2] Ushio M. Proc. metallo-thermo-mechanics application to phase transformation incorporated processes[A]. Theoretical prediction in joining and welding[C]. Osaka, 1996. 89~111.

[3] 魏艳红, 刘仁培, 董祖珏. 不锈钢焊接凝固裂纹温度场的数值模拟[J]. 焊接学报, 1999, 20(3): 199~203.

[4] 刘仁培, 董祖珏, 魏艳红. 焊接凝固裂纹数值模拟前处理系统[A]. 第十次全国焊接学会论文集(1)[C]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 2001. 201~204.

[5] 魏艳红, 刘仁培, 董祖珏. 焊接凝固裂纹数值模拟后处理系统[A]. 第十次全焊接学会论文集(1)[C]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 2001. 205~208.

[6] 樊 丁, 陈剑虹. 焊接CCT图的计算机辅助推定模型及程序系统[J]. 甘肃工业大学学报, 1995, 21(4): 6~12.

[7] 魏艳红, 刘仁培, 董祖珏. 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.

[8] 刘仁培, 董祖珏, 魏艳红. 不锈钢焊接凝固裂纹应力应变场数值模拟模型的建立[J]. 焊接学报, 1999, 20(4): 238~243.

[9] 赵海燕, 鹿安理, 史清宇, 等. 焊接结构CAE中数值模拟技术的实现[J]. 中国机械工程, 2000, 11(7): 732~734.

[10] 鹿安理, 史 静, 赵海燕. 焊接过程仿真领域的若干关键技术问题及其初步研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1/2): 201~205.

[11] 董俊慧, 霍立兴, 张玉凤. 低碳钢管道焊接残余应力有限元分析[J]. 焊接, 2000(12): 11~15.

[12] 刘 敏, 霍立兴. 延性断裂韧度统计分布的数值模拟方法[J]. 焊接学报, 2000, 21(2): 14~17.

[13] 汪建华. 焊接力学数值模拟的发展及其工程应用[A]. 第十次全国焊接学会论文集(2)[C]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 2001. 492~495.

[14] Yurioka N, Koseki T. Modelling activities in Japan[A]. Proc. Theoretical Prediction in Joining and Welding[C]. Osaka, Japan, Nov. 1996, 39~58.

[15] 张显辉, 谭长瑛, 陈佩寅. 焊接接头氢扩散数值模拟(1)[J]. 焊接学报, 2000, 21(3): 51~54.

[16] Nied H A. The finite element modeling of the resistance spot welding process[J]. Welding Journal, 1984, 63(4): 123~132.

[17] 何 鹏, 张九海, 冯吉才, 等. 相变扩散连接界面生成金属间化合物的数值模拟[J]. 焊接学报, 2001, 21(3): 75~78.

[18] 田艳红, 王春青. 钎料球激光重熔温度场数值模拟[J], 焊接学报, 2001, 22(2): 75~78.

作者简介: 吴言高, 男, 1978年11月出生, 天津大学材料学院2000级硕士研究生。研究方向为焊接冶金性及材料加工性。

Email: somuch@263.net