

汪建华 等编著

HANJIE SHUZHIMONI JISHU JIQI YINGYONG

焊接数值模拟技术 及其应用

上海交通大学出版社

本书得到上海市研究生教育专项经费资助

焊接数值模拟技术 及其应用

汪建华 编著

上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书对焊接数值模拟技术及其应用进行了较全面和系统的阐述,反映了该领域国内外的现状和进展。内容包括:焊接热传导、焊接熔池中的流体动力学、焊接电弧的传热传质过程、焊接冶金和焊接接头组织性能的预测、焊接变形和残余应力的预测、高温蠕变分析和局部焊后热处理、焊接过程中的氢扩散、特种焊接过程的数值模拟以及焊接接头的力学行为分析等。其中特别对焊接变形的预测方法及其工程应用作了详细的介绍。最后两章介绍了焊接数值模拟在ANSYS 软件中的实现以及三维焊接热传导有限元程序(WTEMP-3D)的详细使用说明及其应用。本书可作为高等院校有关专业的研究生教材和本科生参考书,也可供广大焊接工作者学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

焊接数值模拟技术及其应用/汪建华编著. —上海:
上海交通大学出版社, 2003
上海市研究生教学用书
ISBN 7-313-03320-6

I. 焊... II. 汪... III. 焊接—数值模拟—研究生—教材 IV. TG4

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第012538号

焊接数值模拟技术 及其应用

汪建华 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

常熟市文化印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:14.25 字数:267千字

2003年10月第1版 2003年10月第1次印刷

印数:1—1550

ISBN7-313-03320-6/TG·050 定价:21.00元

版权所有 侵权必究

前言

随着计算机技术和计算方法的发展,数值模拟技术已经成为现代工程学形成和发展的一个重要推动力。焊接是一个牵涉到电弧物理、传热、冶金和力学的复杂过程。焊接现象包括焊接时的电磁、传热过程、金属的熔化和凝固,冷却时的相变、焊接应力与变形等等。一旦各种焊接现象能够实现计算机模拟,我们就可以通过计算机系统来确定焊接各种结构和材料时的最佳设计、最佳工艺方法和焊接参数。1993年,美国能源部组织美国、加拿大、日本、瑞典和英国等25位著名专家对21世纪焊接科学技术的发展动向做出预测,其中焊接基本现象的模拟与仿真被列为最重要的研究方向之一。我国国家自然科学基金委员会制定的学科发展战略也将计算机模拟确定为机械热加工领域的发展方向之一。计算机模拟是使包括焊接在内的热加工工艺研究从“定性”走向“定量”、从“经验”走向“科学”的重要标志。

近20年来,特别是20世纪90年代以来,焊接数值模拟技术在国内外都得到了很快的发展。有关国际会议有"Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes"以及"Numerical Analysis of Weldability"等,已经举办了多届。后者由国际焊接学会(IIW)第IXB分委会焊接性数值分析工作组与奥地利的Graz工业大学共同组织,每两年举行一次,并出版专集。1996年11月日本大阪大学接合科学研究所(JWRI)组织了一个“关于焊接加工预测理论”的国际讨论会,对当前焊接数值模拟技术的各个领域进行了交流。我国焊接学会数值分析与CAD/CAM专业委员会(现改名计算机应用技术专业委员会)曾组织了多次“计算机在焊接中的应用”技术交流会,促进了我国焊接领域中计算机的应用,其中包括数值模拟技术在焊接中的应用。在国内这些开创性工作中,应该提到的是上海交通大学陈楚教授,已故的著名焊接力学专家西安交通大学唐慕尧教授,以及至今还在该领域辛勤耕耘的清华大学陈丙森教授。

早在1985年,作者曾参与编写并出版了《数值分析在焊接中的应用》一书,介绍了焊接数值模拟技术的一些基本方法和当时该领域的研究情况。然而该书已不能适应当代焊接数值模拟技术的发展。当前在高等院校的教学与科研以及在焊接工程实践中,感到迫切需要一本这方面合适的教材和参考书。它不仅介绍焊接数值模拟技术的一些基本原理和当前的进展情况,也希望能在科研、工程应用和计算机操作方面得到实际的帮助。为此作者在参与撰写中国焊接学会数值分析与CAD/CAM专业委员会组织的《计算机辅助焊接技术》一书的第四章“焊接数值

模拟技术”的基础上,本书作扩充,增加了焊接热传导的解析方法、焊接变形的残余塑变的解析计算方法、焊接变形的固有应变有限元方法以及蠕变有限元分析与局部焊后热处理等。特别是在书末介绍了焊接数值模拟在 ANSYS 软件中的实现以及三维焊接热传导有限元程序(WTEMP-3D)的详细使用说明及其计算例,使读者能够实际操作和应用。因此,本书可作为高等院校有关专业的教材或参考书,也可供广大焊接工作者学习和参考。

本书由汪建华主编,陆皓和陈俊梅分别参加了第7章部分章节以及第11章的编写。由于编著者水平有限,书中缺点、错误在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

2003年3月于上海

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数值模拟在当代科技发展中的地位	1
1.2 模型和数学模型	2
1.3 数值方法	3
1.3.1 差分法	3
1.3.2 有限元法	4
1.3.3 数值积分法	4
1.3.4 蒙特卡洛法	4
1.4 数值模拟技术在焊接中的应用	5
1.5 焊接数值模拟的前景与展望	7
第 2 章 焊接热传导分析	9
2.1 研究历史和现状	9
2.2 焊接热传导的解析方法	10
2.2.1 表面堆焊时的焊接热传导解析式	10
2.2.2 适用范围和临界值的判别	12
2.2.3 接头形式与坡口的修正	13
2.3 有限元模型和求解方法	16
2.3.1 有限元基本方程	16
2.3.2 非线性方程组解法	19
2.3.3 热源模型的选取	19
2.3.4 网格划分和时间步长	19
2.3.5 熔化和固态相变潜热	20
2.3.6 采用集中质量热容矩阵克服“跃阶”现象	20
2.4 分析实例	21
2.4.1 热影响区 800℃ 冷却到 500℃ 时的冷却时间 $t_{8/5}$ 的 分析计算	21
2.4.2 脉冲 TIG 焊接温度场分析	21
2.4.3 平板堆焊三维温度场有限元分析	23
第 3 章 焊接熔池中的流体动力学和传热分析	25

3.1	研究历史和动态	25
3.2	数学模型和求解方法	28
3.2.1	控制方程组	28
3.2.2	体积力	29
3.2.3	边界条件	29
3.2.4	求解方法	30
3.3	分析实例	31
3.3.1	三维 TIG 熔池流体流动和传热过程	31
3.3.2	薄板 GMAW 焊接时计算和试验结果的比较	32
3.3.3	激光照射下铝的熔化和蒸发	33
第 4 章	焊接电弧的传热传质过程	34
4.1	研究历史和动态	34
4.2	数学模型和求解方法	35
4.2.1	基本方程	35
4.2.2	边界条件	37
4.2.3	计算方法	39
4.3	分析实例	39
4.3.1	TIG 焊接电弧的温度和流场分布	39
4.3.2	GTAW 和 GMAW 焊接时电极性质的预测	41
第 5 章	焊接冶金和焊接接头组织性能的预测	43
5.1	概述	43
5.2	熔池和焊缝金属的凝固与组织变化	44
5.2.1	研究动态	44
5.2.2	Oak Ridge 焊缝金属组织模型	47
5.3	焊接热影响区的相变和组织性能的预测	49
5.3.1	研究动态	49
5.3.2	固态相变演化规律的应用	50
5.3.3	焊接接头组织连续变化的预测模型	52
5.3.4	热影响区的硬度计算	55
第 6 章	焊接变形与残余应力的预测	57
6.1	概述	57
6.2	焊接变形的残余塑变解析计算方法	61
6.2.1	一维的简化残余塑变基本理论	61

6.2.2	残余塑变基本解析公式.....	61
6.2.3	梁架型结构纵向焊接变形的计算.....	63
6.2.4	多道焊横向收缩和角变形的计算.....	67
6.2.5	焊接应力变形形成机制的讨论与固有应变概念的引入.....	68
6.2.6	残余塑变解析计算例.....	76
6.3	预测焊接变形的固有应变有限元方法.....	78
6.3.1	固有应变的基本概念.....	78
6.3.2	焊接固有应变的确定.....	79
6.3.3	关于 Tendon Force 的概念.....	83
6.3.4	固有应变的施加方法.....	84
6.3.5	固有应变有限元计算实例.....	84
6.4	焊接热弹塑性有限元求解方法.....	88
6.4.1	基本方程和求解方法.....	88
6.4.2	提高计算精度和稳定性的若干途径.....	90
6.4.3	热弹塑性有限元分析实例.....	91
6.5	几种预测焊接变形方法的比较.....	94
第 7 章	高温蠕变分析和局部焊后热处理.....	95
7.1	概述.....	95
7.2	基于残余应力消除效果的直接评定准则.....	96
7.2.1	考虑蠕变的粘弹塑性有限元分析方法.....	96
7.2.2	加热宽度直接评价方法.....	97
7.2.3	局部焊后热处理引起的热应力和残余应力.....	98
7.2.4	焊后消除应力处理的蠕变有限元分析.....	99
7.2.5	不同热处理条件下的系列计算和临界加热宽度的确定.....	101
7.3	基于改善焊接接头性能的均热区温差准则.....	102
7.4	两个评定准则的关系和比较.....	103
7.5	三维管接头焊后局部热处理加热宽度准则研究.....	104
7.5.1	正交管接头焊后局部热处理.....	104
7.5.2	计算模型的交贯线方程.....	104
7.5.3	计算模型和方法.....	106
7.5.4	应力分布特征及加热宽度准则的确定.....	108
7.6	分析实例.....	109
第 8 章	焊接过程中的氢扩散.....	112

8.1	概述	112
8.2	焊接氢扩散的数学物理模型	112
8.2.1	氢扩散基本方程	112
8.2.2	活性系数	113
8.2.3	扩散系数	113
8.2.4	平均压力项系数	113
8.2.5	氢的表面逸出和边界条件	114
8.3	计算实例	114
第 9 章	特种焊接过程的数值模拟	116
9.1	电阻点焊过程和接头性能分析	116
9.2	陶瓷-金属焊接的残余应力特征	118
9.3	激光焊接熔化和凝固的数学模型	119
9.4	摩擦焊接的数学模型	120
9.5	瞬态液相连接模型	121
9.6	搅拌摩擦焊接的传热和力学计算模型	122
9.7	水火弯板和感应加热成形	123
9.8	胀管接头的弹塑性有限元分析及其应用	124
第 10 章	焊接接头的力学行为分析	126
10.1	概述	126
10.2	焊接接头断裂力学描述参量	126
10.3	力学不均匀性对焊接接头断裂参量的影响	127
10.4	几何不均匀性对焊接接头断裂参量的影响	130
10.5	焊接接头断裂强度评定的局部近似法	131
10.6	局部法在焊接接头疲劳强度评定中的应用	133
第 11 章	焊接数值模拟在 ANSYS 软件中的实现	136
11.1	用 ANSYS 软件进行有限元分析的典型过程	137
11.2	ANSYS 软件在焊接应力分析中的应用	138
11.2.1	间接法进行热应力分析	138
11.2.2	直接法进行热应力分析	140
11.3	ANSYS 软件在用固有应变法进行焊接变形分析中应用	142
第 12 章	三维焊接热传导有限元程序(WTEMP-3D)的应用	146
12.1	三维焊接热传导有限元程序(WTEMP-3D)的说明及其应用	146
12.1.1	程序功能	146

12.1.2	输入参数说明.....	146
12.1.3	数据输入格式(TM.DAT 文件)	151
12.1.4	数据输出格式.....	154
12.1.5	数据输入格式例.....	154
12.2	WTEMP-3D 源程序	156
参考文献.....		211

第 1 章 绪论

1.1 数值模拟在当代科技发展中的地位

计算机、信息、网络等技术的飞跃发展,给人类的生活环境、文化氛围带来了深刻的变化。这种深刻的变化必然反映到政治、经济、军事、科技和文化教育等各个方面。计算机对科学技术的影响是极其深远的,其中一个重要原因就是计算机已经并将继续大大地扩展问题的可解范围。科学计算包括应用各种类型的计算机,通过选择恰当的数值方法和技巧去求解或模拟科学和工程中的问题。在过去几十年中,计算机包括巨型机的发展对国防、航天、能源、气象、石油和核工业等的研究及生产作出了实质性的贡献并产生了巨大效益。在诸如量子场理论,材料相转化的起源,湍流理论的发展,金属裂纹的传播及油田开发等问题中,只有很小一部分能够用解析方法来解决,其他大部分问题都要通过数值方法、物理实验等手段来揭示其内在的性质。例如利用大型计算机作飞机外形设计,数值计算结果表明,机翼的阻力比用传统的物理实验方法所设计的减少 40%。在大型核电站和大型先进武器系统的设计方面,数值模拟也是不可缺少的,它起着代替部分物理实验的作用。总之,当今高度复杂的科学和工程问题的求解计算包括利用数学方程来模拟物理、化学、生物和工程等过程的各种问题,包括寻求解释模型中出现的非线性现象的数学理论及计算方法和研制相应的数值软件^[1]。

随着现代科学技术的发展,数学模型和数值模拟技术的地位显得越来越重要了。在工程学的一些领域中已被视为与实验同等的重要。其原因有下列几方面:

1) 由于系统越来越高性能化或复杂化,单纯的实验已难以使严峻的状况重现出来。例如阿波罗卫星返回地球时在高 120km 左右的大气层上端竟达到 11km/s 的速度,仅用 30min 左右就回到地面。即使想要将这样的状态用风洞实验来重现,由于需极大规模的设备而终究不能实现。

2) 有些问题只有使用数学模型方能明了其状况。例如,最近的电子仪器或机械零部件性能稳定而且可靠性已非常高,其中包括故障率为百万分之一的极优秀作品。但一颗人造卫星则汇集了 500 万个以上这种零部件,所以实际上有发生故障的可能。对这种系统的可靠性就有必要作出故障或可靠度的数学模型。因为故障的出现的概率极小,因而难以依照多数实验结果作统计处理来确定复杂系统的可靠度。

3) 计算机,性能已经大大提高和普及。目前甚至可以把计算机看作是一个能够用于多目的和多用途的万能实验装置,可以用来模拟化学反应,对复杂结构的应力计算或物体周围气体的再现等。这种研究方法与过去的小规模实验相比,方式不同,具有很大的优越性以及高的效能和效益,也称之为数值试验。

4) 虚拟工程的出现,并首先在军事、航空航天、汽车领域中获得成功的应用。虚拟工程使整个制造过程在计算机上得到预演和实现,大大缩短了产品的开发周期,提高了产品的市场竞争力。在虚拟工程中,数学模型和数值模拟技术是一个十分重要的手段。

1.2 模型和数学模型

首先讨论什么是模型。模型是对客观世界(实体)的特征和变化规律的一种定量的抽象。在科学研究中,模型是人们用以认识事物的一种手段和工具。自然科学中诸如经典力学、量子力学、有机化学及近代物理学中的重大发现,都得益于模型的帮助。通常模型可分为3类:物理模型、数学模型和描述模型^[2]。

物理模型是简化的、类似于实际系统的某些突出特征而设想的一种物理系统,可分为静态模型和动态模型。静态模型如比例模型等。动态模型又称类比模型,在研究一些物理本质不同,而变量关系类似的物理系统,如电路系统和机械系统,电路系统和流体系统之间,往往要用到此类模型。

数学模型是用数学语言描述的某个现实世界的模型。数学模型可以定量地描述事物的内在联系和变化规律。因此,建立某个系统的数学模型,是人们对该事物认识的一个质的飞跃。数学模型也可分为静态和动态两类。静态数学模型是当一个实体处于平衡状态的取值,不含时间的因素。动态数学模型描述由于实体活动所引起随时间的变化。实质上,静态模型可以认为是动态模型的一种特例,是动态模型在某一时刻或某一时间段内的取值。数学模型的第二层次是按对数学方程的求解方法来划分的。不论是静态的或动态的,可用解析方法和数值方法求解。解析方法是直接应用现有的数学理论和定律去推导和演绎数学方程(模型)得到用函数形式表示的解,也就是解析解。解析法的优点是物理概念及逻辑推理清楚,所得到的解能比较清楚地表示出各种因素的影响。另外,得到的解析解比较精确,可以作为对其他方法,尤其是对数值解法所求得解的精确性进行校核。但解析法只能用于有限的范围,对许多用以描述复杂系统的高阶、非线性、时变的微分方程,就很难用解析法求解。数值方法又叫数值分析,是用计算机程序来求解数学模型的近似解,有时称之为数值模拟或计算机模拟。此外,模型按变量变化的特点可分为离散模型和连续模型,按变量的性质可分为确定型模型和概率型模型等。建立数学模型必须正确理解现象,数学求解若能很好地说明实验和调查的结果,

则此数学模型是正确的。

描述模型是近年来对社会科学, 心理学, 哲学及人工智能的研究中发展起来的一类重要模型。它是一个抽象的, 很难用数学方程表达, 只能用语言(自然语言, 程序语言)描述的系统模型。描述模型源于计算机科学的分支——人工智能。描述模型与数学模型的主要差别是, 数学模型的解是计算出来的, 而描述模型的解是“探索”出来的, 在探索过程中不断地完善和发展, 这样更接近人类的思维过程。当前, 人工智能中发展最快的一个领域是所谓“专家系统”。专家系统的主要问题就是建立具有专家知识和经验的“知识模型”, 即描述模型。可以认为, 描述模型是向量化、数学化目标发展的一个中间过程。随着我们对系统行为的深入了解和数学的发展, 有许多描述模型最终将可以用精确的数学模型来描述。

1.3 数值方法

前面已经讨论过解析方法和数值方法的区别, 数值方法就是研究数学问题的数值解法。在焊接工程中经常遇到的一些问题, 如焊接热过程、焊接应力和变形、焊接构件的应力分析、焊接过程中的氢扩散等问题, 通常可以归结为解某些特定的微分方程组。然而, 只有在十分简单的情况下并且作许多简化的假定, 才有可能求得这些方程闭合的解析解。而实际问题多种多样, 边界条件十分复杂, 用解析方法来求解这类微分方程是十分困难的。在高速电子计算机发展的今天, 大多采用数值解法。数值解法有差分法、有限元法、数值积分法、蒙特卡洛法等。下面简单介绍上述数值方法的一些特点。

1.3.1 差分法

差分法的基础是用差商来代替微商, 相应地就把微分方程变为差分方程来求解。为了用差分方程代替微分方程, 首先必须对求解区域离散化。这样, 微分方程和边界条件的求解就归结为求解一个线性代数方程组, 得到数值解。用不同方法定义差商可得一系列的差分格式: 向前差分、向后差分、平均差分、中心差分、加列金格式等。不同的差分格式其误差和稳定性各不相同, 如向前差分是有条件稳定的, 向后差分则是无条件稳定的, 而平均差分虽然精度较高但容易发生振荡等。因此使用差分法时要选择合适的差分格式, 合理的网格划分和步长的选取, 以尽可能减少误差, 保证解的精度和稳定性。差分法的研究已有较长的历史。差分法的长处是对于具有规则的几何特性和均匀的材料特性问题, 它的程序设计和计算过程比较简单, 收敛性也较好。差分法的缺点是往往局限于规则的差分网格(正方形、矩形、正三角形等), 显得较呆板不够灵活。另外, 差分法只看到了节

点的作用而忽略了把节点连接起来的单元的贡献。在焊接研究中差分法常用于焊接热传导、熔池流体动力学、氢扩散等问题的分析。

1.3.2 有限元法

有限元法是适应使用电子计算机而发展起来的一种比较新颖和有效的数值方法。这个方法 20 世纪 50 年代起源于航空工程中飞机结构的矩阵分析。1960 年被推广用来求解弹性力学的平面应力问题。虽然这一方法起源于结构分析,但是,由于它所依据的理论的普遍性,已经能够成功地用来求解其他工程领域中的许多问题,如传热、电磁场、流体力学等领域的问题。可以说,现在它几乎适用于求解所有的连续介质和场的问题。

有限元法的第一步是将连续体简化为由有限个单元组成的离散化模型,第二步对离散化模型求出数值解答。有限元法的主要优点是:

(1) 概念清晰,容易掌握,可以在不同水平上建立对该法的理解。可以通过直观的物理途径来学习和运用这一方法,也可以建立在严格的数学基础之上。

(2) 该法有很强的灵活性和适用性,应用范围极其广泛。它对于各种复杂的因素,如复杂的几何形状,任意的边界条件,不均匀的材料特性,非线性的应力-应变关系等,都能灵活地加以考虑,不会发生处理上的困难。

(3) 该法采用矩阵形式表达,便于编制计算机程序,可以充分利用高速电子计算机所提供的资源。

在焊接领域中,有限元法已经广泛地用于焊接热传导、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的研究。

1.3.3 数值积分法

通常在微积分学中,积分值是通过寻找原函数的办法来得到的。但在许多情况下,寻找原函数往往是相当困难的,许多函数甚至找不到原函数。这时,就可以用数值积分法来求解。最简单的数值积分方法是求积节点(积分点)等间距的两点公式(梯形法则)及三点公式(辛普生法则)。此外还有五点求积公式及变步长的梯形法则等。还有一种数值积分法是高斯求积法,这种方法求积的节点是不等距的,可以用较少的求积点而达到较高的精度。

1.3.4 蒙特卡洛法

蒙特卡洛法亦称为随机模拟,随机抽样技术或统计试验。所谓蒙特卡洛法是对某一问题作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包含的未知量的方法。此时,如果作为问题的现象是随机过程,可以原封不动地对它进行数值化模拟。

但是,现象为确定的情况也可以适当地设定随机过程而应用这个方法。蒙特卡洛法在多重积分计算中得到重要的应用。

上述数值方法在工程应用中常相互交叉和渗透。如在瞬态热传导有限元分析中,在空间域采用有限元方法,而在时间域则采用差分方法,两者结合进行求解。

1.4 数值模拟技术在焊接中的应用

焊接是一个牵涉到电弧物理、传热、冶金和力学的复杂过程。焊接现象包括焊接时的电磁、传热过程、金属的熔化和凝固,冷却时的相变、焊接应力与变形等等。要得到一个高质量的焊接结构必须要控制这些因素。一旦各种焊接现象能够实现计算机模拟,我们就可以通过计算机系统来确定焊接各种结构和材料时的最佳设计、最佳工艺方法和焊接参数。例如大家知道,焊接时不合理的热过程是引起焊接裂纹、接头脆性以及使焊接应力与变形不合格的主要原因,因此必须通过设计和制造工艺参数的正确选择来控制这些冶金变化以及焊接应力和变形,设计合适的焊接接头形式,选择合理的焊接规范和预热温度等。自动化焊接的范围在很大程度上亦将决定于能够模拟焊接现象的程度。此外,数值模拟还广泛地用于分析焊接结构和接头的强度和性能等问题。

焊接工艺过去一般总是凭经验的,通常是通过一系列实验或根据经验来获得可靠而经济的焊接结构。例如利用实验方法确定电弧焊连接普通钢板的最佳焊接条件是很简便的。然而从发展来看,数值模拟的方法将越来越起重要的作用。例如用新的高强钢或其他材料制造新的工程结构,特别是如潜艇、反应堆元件等重要结构,没有多少经验可以凭借。如果只依靠实验方法积累数据要化很长时间和经费,而且任何尝试和失败,都将造成重大经济损失。此时数值方法将发挥其独特的作用和优点。只要通过少量验证试验证明数值方法在处理某一问题上的适用性,那么大量的筛选工作便可由计算机进行,而不必在车间或实验室里进行大量的试验工作。这就大大地节约了人力、物力和时间,具有很大的经济效益。因此计算机模拟方法为焊接科学技术的发展创造了有利的条件。1993年,美国能源部组织美国、加拿大、日本、瑞典和英国等25位著名专家对21世纪焊接科学技术的发展动向做出预测,其中焊接基本现象的模拟与仿真被列为最重要的研究方向之一。我国国家自然科学基金委员会制定的学科发展战略也将计算机模拟确定为机械热加工领域的发展方向之一。计算机模拟是使包括焊接在内的热加工工艺研究从“定性”走向“定量”、从“经验”走向“科学”的重要标志。

近二十几年来,国内外都对数值模拟技术在焊接中应用进行了许多研究,取得了不少成果。国际上比较著名的学者,如日本大阪大学的上田幸雄教授,长期

来从事焊接热弹塑性理论的研究,取得丰硕的成果。在 1996 年上田幸雄先生退官纪念册上有关焊接力学的研究论文就达 228 篇,创建了“计算焊接力学”的新兴学科,并出版“计算焊接力学”的专著。美国 MIT 的 K. Masubuchi 教授在焊接残余应力和变形以及焊接结构分析方面有深入的研究。瑞典的 L. Karlsson 教授,加拿大的 A. Goldak 教授等在焊接热传导和热应力分析以及焊接接头组织性能预测方面作了许多研究并取得不少成果。奥地利的 H. Cerjac 教授在计算机辅助焊接性方面进行了研究。日本的 A. Matsunawa 教授和 M. Ushio 教授分别在焊接熔池和电弧物理方面进行了深入的分析等。国际上有关焊接数值模拟技术的交流也十分活跃。有关国际会议有 " Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes " 以及 " Numerical Analysis of Weldability " 等,已经举办了多届。后者由国际焊接学会 (IIW) 第 IXB 分委会焊接性数值分析工作组与奥地利的 Graz 工业大学共同组织,每两年举行一次,从 1991 年第一届十几人出席交流几篇论文,发展到 1999 年第五届 100 多人出席交流 71 篇论文。1996 年 11 月日本大阪大学接合科学研究所 (JWRI) 组织了一个“关于焊接加工预测理论”的国际讨论会,对当前焊接数值模拟技术的各个领域进行了交流。国内哈尔滨工业大学已承办 3 届“材料热加工物理模拟和数值模拟”国际会议,上海交通大学也于 2000 年 3 月组织了“第一届热加工数学模型和计算机模拟”国际会议。国际上近几年创立了主要报道计算机模拟领域最新成果的学术刊物,如 Computational Materials Science 、 Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering 等。

2000 年日本大阪大学接合科学研究所提出了一个计划五年完成耗资 20 亿日元 (2 千万美元) 的国家课题^[3]:“高效与安全焊接技术的开发”,事实上它包含着一个焊接虚拟工程的研究。其目的是开发一个用户界面友好的高效与安全焊接的计算机系统。它同时给出三个精密模拟程序,即焊接过程模拟程序、被焊区域组织预测程序和变形预测程序。其中各个模拟程序的目标为:

(1) 焊接过程模拟程序包含一个电弧等离子模型,要求无须局部热动力学平衡的假定,焊接熔池尺寸的预测精度达到 $\pm 10\%$ 。

(2) 被焊区域组织预测程序包含一个针状铁素体的形成模型,要求铁素体、针状铁素体成分和室温强度的预测分别在 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 和 $\pm 50\text{MPa}$ 以内。

(3) 焊接变形程序包括面外变形预测精度在 $\pm 15\%$ 以内。为了开发上述模拟程序,尚需进行一系列精密的实验验证,包括物理性能的测定,如等离子环境下熔池的表面张力、固态和熔池的热导率等。

国内在 20 世纪 80 年代初开始了焊接数值模拟方面的研究工作,近些年来也取得了不少的研究成果。西安交通大学和上海交通大学较早开展了焊接传热和热弹塑性应力分析并做了许多工作。最近上海交通大学在三维焊接问题分析中取得了很大的进展,并在实际工程中得到了成功的应用。清华大学进行了辅助热源影

响焊缝应变规律的数值分析。哈尔滨工业大学、山东大学和甘肃工业大学在焊接熔池和电弧物理方面进行了数值研究。大连铁道学院在焊接传热、组织性能预测和氢扩散方面进行了研究。上述的研究中不少是和国外合作进行的。

目前,焊接数值模拟已遍及各个焊接领域,主要研究内容有:

- (1) 焊接热传导分析;
- (2) 焊接熔池流体动力学;
- (3) 电弧物理;
- (4) 焊接冶金和焊接接头组织性能的预测;
- (5) 焊接应力与变形;
- (6) 焊接过程中的氢扩散;
- (7) 特殊焊接过程的数值分析,如电阻点焊、陶瓷金属连接、激光焊接、摩擦焊接和瞬态液相焊接等;
- (8) 焊接接头的力学行为。

表 1-1 为焊接数值模拟中常遇到的问题、物理现象和数值分析方法。

表 1-1 焊接数值模拟的问题和数值方法

问 题	物理现象	数值方法
热源	电磁	差分法
熔池	传热与传质	有限元法
凝固	相变	数值积分法
金相组织	化学反应	蒙特卡洛法
残余应力	扩散	
焊接变形	弹塑性, 蠕变	
裂缝	失效	
焊接结构强度	断裂	

1.5 焊接数值模拟的前景与展望

焊接是一个牵涉到传热学、电磁学、材料冶金学、固体和流体力学等多学科交叉的复杂现象。如上所述,在计算机技术日益发展的今天,采用数值方法来模拟复杂的焊接现象已经取得了很大的进展。数值模拟技术已经渗入到焊接的各个领域,取得了可喜的成绩。然而应该看到这些研究还是初步的,还有许多深入的研究工作要做。关键是要进一步认识焊接数值模拟技术的意义和作用,同时必须正确和真实地掌握和阐明焊接现象的本质,才能建立起准确的数学模型。而正确的数值模拟也有助于对焊接过程规律的进一步理解。焊接数值模拟更重要的作用是优化结构设计和工艺设计,提高焊接接头的质量。因此焊接数值模拟技术具有