



# 焊接过程的数值模拟

金成 编著

非  
外  
借



科学出版社

# 焊接过程的数值模拟

金 成 编著

科 学 出 版 社

## 内 容 简 介

焊接是一个涉及电弧物理、传质传热、力学、冶金与材料学等多物理场耦合的复杂过程,影响因素繁多。随着计算机科技的快速发展,焊接数值模拟技术得到了越来越广泛的关注和应用。本书以“理论介绍—数值模拟实现方法—具体应用案例”为主线,结合通用数值模拟软件及实用的算例,对多种常见焊接方法及焊接过程中涉及的热、力、微组织相变、电弧及溶池流体等诸多物理过程给出了数值模拟实现方法。

本书理论讲解详细深入,实例内容丰富、可操作性强,可作为高等院校焊接技术与工程及其相关专业本科生及研究生学习焊接数值模拟技术和相关软件的教材,也可供广大焊接工程技术人员学习和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

焊接过程的数值模拟/金成编著. —北京:科学出版社, 2017  
ISBN 978-7-03-055103-0

I. ①焊… II. ①金… III. ①焊接工艺—数值模拟 IV. ①TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 269376 号

责任编辑:冯涛 徐仕达 杨昕 / 责任校对:马英菊  
责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方人华平面设计部

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年11月第一版 开本:B5(720×1000)

2017年11月第一次印刷 印张:13 1/4

字数:267 000

定价:85.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈京华虎彩〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135397-2032

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

# 前 言

人类利用焊接技术已有上千年的历史，然而对焊接过程的科学认识仍在孜孜探索。焊接方法多种多样，焊接过程又是一个涉及电弧物理、传质传热、冶金和力学行为的复杂过程。单纯依靠理论研究或实践实验，有时很难对焊接过程涉及的物理现象进行定量的、科学的认识和把握。随着计算机软硬件技术的发展，数值模拟技术已经渗透到焊接的各个研究领域，在航空航天、军工、能源、交通等领域，关键部件焊接过程仿真技术的实现，对优化工艺过程、提高产品质量和消除安全隐患起着日益重要，甚至不可替代的作用。

时至今日，焊接数值模拟技术虽已发展多年，有了长足进步，但是对于大多数初学者而言，仍显得门槛过高。本书从多个侧面对复杂的焊接过程进行分解，并附以基础实例分析，力求使广大焊接专业的学生和从业者从中受益。

由于篇幅所限，本书不求、也无法包括焊接数值模拟的所有领域，仅就焊接过程的几个最基本的方面，在有限元数值模拟范畴内进行探讨；旨在为读者提供焊接数值模拟领域最基本的认识，使读者掌握基本的技能，并能通过计算机软件解决焊接工作中的实际问题。

全书共8章，第1章简要介绍焊接物理过程的特点及焊接数值模拟的基本方法、内容及意义。第2章系统阐述焊接过程中涉及的几大物理过程及其数学描述，为焊接过程的数值模拟打下理论基础。第3章介绍应用数值模拟软件进行焊接过程模拟的基本步骤与基础操作。第4~8章为具体应用案例。其中第4章介绍焊接热力模拟过程中的热弹性法及其应用，对电弧焊接温度场、应力场及焊后变形的模拟计算给出了详细的说明。第5章介绍焊接固有应变法的基本原理、有限元数值模拟实现方法及典型案例。第6章介绍两种常用的特种焊——电阻点焊与搅拌摩擦焊的数值模拟方法。第7章介绍焊接热影响区组织相变的有限元模拟方法。第8章介绍焊接电弧及熔池的流体力学模拟。

本书选取典型案例，并对各焊接过程的数值模拟配以相关程序和操作过程的详细说明，读者可自行练习。在编写本书的过程中，作者引用和借鉴了部分专家学者的书籍、论文及一些研究生的工作内容，在此一并表示感谢。同时，感谢国家自然科学基金项目资助（项目编号：51105049）和国家留学基金资助（项目编号：201508210032），以及深圳国家超算中心提供软硬件平台。

由于作者专业水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请各位专家和学者批评指正。

作者

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 焊接物理过程的复杂性	1
1.2 数值模拟的基本概念与步骤	3
1.3 数值方法与数值模拟软件	4
1.4 焊接数值模拟的内容	5
1.5 焊接数值模拟的意义与发展概况	6
第 2 章 焊接物理过程基础	8
2.1 焊接热过程	8
2.1.1 常用焊接热源及热效率	9
2.1.2 焊接热源模型	11
2.1.3 焊接温度场及传热定律	16
2.2 焊接应力与材料力学本构	18
2.2.1 焊接残余应力的产生	18
2.2.2 材料的率无关弹塑性本构	19
2.3 接头热影响区微观组织演化	22
2.3.1 接头微观组织演化简介	22
2.3.2 相变描述方法	25
2.3.3 相变模型	26
2.4 焊接电弧与焊接熔池	30
2.4.1 焊接电弧	30
2.4.2 焊接熔池	34
第 3 章 有限元软件基础	37
3.1 Abaqus 软件基础	37
3.1.1 Abaqus 软件简介	37
3.1.2 Abaqus 帮助文档	38
3.2 Abaqus 的初步使用	39
3.2.1 Abaqus 分析的基本步骤	39
3.2.2 Abaqus/CAE 简介	40

3.2.3	Abaqus/CAE 的功能模块	41
3.3	Abaqus 中的单位体制	46
3.4	Abaqus 中的单元	46
3.4.1	单元的分类	46
3.4.2	单元的特征与命名	47
3.4.3	单元的选择	48
3.5	Abaqus 的主要文件类型	49
3.6	.inp 文件	50
3.6.1	.inp 文件的组成	50
3.6.2	.inp 文件的结构	50
3.6.3	.inp 文件的语法格式	50
3.6.4	.inp 文件的修改	52
3.6.5	.inp 文件的执行	52
3.7	Abaqus 用户子程序文件	53
3.7.1	Abaqus 用户子程序	53
3.7.2	用户子程序的编写	54
3.7.3	用户子程序的执行	56
3.8	ANSYS Fluent 软件简介	56
3.9	Fluent 计算流程	56
3.10	Fluent 的初步使用	57
3.10.1	Fluent 的启动与主界面	57
3.10.2	Fluent 读入与检查网格	59
3.10.3	物理模型的选择	59
3.10.4	材料属性设置	59
3.10.5	相的设定	60
3.10.6	计算域条件设定	60
3.10.7	边界条件设定	60
3.10.8	动网格设置	61
3.10.9	参考值设置	61
3.10.10	求解器算法设置	61
3.10.11	求解参数设置	62
3.10.12	求解监视窗口设置	63
3.10.13	初始化设置	63
3.10.14	运算设置	63

3.10.15 运行计算设置 .....	64
3.10.16 结果设置 .....	64
3.11 Fluent 用户自定义程序 .....	64
3.11.1 UDF 概述 .....	64
3.11.2 Fluent 中的网格拓扑 .....	65
3.11.3 UDF 中的自定义函数 .....	65
3.11.4 编译与加载 UDF .....	67
3.12 用户自定义内存变量 .....	69
3.13 用户自定义标量 .....	69
<b>第 4 章 焊接热力模拟——热弹塑性法</b> .....	<b>72</b>
4.1 热弹塑性法的基本假设 .....	72
4.2 热源参数及材料性能参数 .....	72
4.3 模拟过程中需要注意的问题 .....	73
4.3.1 热力耦合方式的选取 .....	73
4.3.2 热源模型的选择与校核 .....	73
4.3.3 有限元网格大小的选取 .....	76
4.4 电弧焊接热力耦合综合实例 .....	78
4.4.1 问题描述 .....	78
4.4.2 问题分析 .....	78
4.4.3 Abaqus/CAE 温度场分析过程 .....	79
4.4.4 Abaqus/CAE 应力场模拟分析过程 .....	89
<b>第 5 章 焊接热力模拟——固有应变法</b> .....	<b>101</b>
5.1 固有应变法的基本理论 .....	102
5.1.1 固有应变的基本概念 .....	102
5.1.2 固有应变法与热弹塑性法的关系 .....	103
5.1.3 固有应变法的解析计算 .....	104
5.1.4 固有应变法的有限元计算 .....	105
5.2 固有应变参数的确定 .....	106
5.2.1 纵向固有应变系数的确定 .....	107
5.2.2 横向固有应变系数的确定 .....	111
5.3 固有应变的施加区域 .....	111
5.4 多道焊的固有应变 .....	113



5.5	T形接头的纵向固有应变	114
5.6	固有应变法平板堆焊综合实例	115
5.6.1	问题描述	115
5.6.2	问题分析	115
5.6.3	Abaqus/CAE 分析过程	117
<b>第6章</b>	<b>特种焊的数值模拟</b>	<b>125</b>
6.1	点焊过程的数值模拟	125
6.1.1	电阻点焊过程的特点	125
6.1.2	点焊数值模拟分析方法的演化过程	126
6.2	点焊热-力-电耦合模拟综合实例	127
6.2.1	问题描述	127
6.2.2	问题分析	128
6.2.3	Abaqus 热-力-电耦合分析过程	129
6.3	搅拌摩擦焊的数值模拟	140
6.3.1	搅拌摩擦焊简介	140
6.3.2	搅拌摩擦焊的数值模拟方法	141
6.4	搅拌摩擦焊动力学模拟实例	145
6.4.1	问题描述	145
6.4.2	问题分析	146
6.4.3	搅拌摩擦焊动力学分析过程	146
<b>第7章</b>	<b>焊接热影响区组织模拟</b>	<b>154</b>
7.1	焊接热影响区组织转变与 Kirkaldy 模型	154
7.2	低合金钢焊接热影响区组织演变模拟实例	158
7.2.1	问题描述	158
7.2.2	问题分析与思路	159
7.2.3	子程序编制要点	159
7.2.4	焊接热影响区相变模拟具体过程	161
<b>第8章</b>	<b>焊接电弧及熔池的流体力学模拟</b>	<b>167</b>
8.1	焊接电弧的流体力学模拟	167
8.1.1	电弧等离子体的特点与基本假设	167
8.1.2	电弧控制方程	168

8.2 TIG 焊电弧流体力学模拟综合实例 .....	170
8.2.1 问题描述 .....	170
8.2.2 问题分析 .....	170
8.2.3 TIG 焊电弧流体力学模拟过程 .....	171
8.3 焊接熔池的流体力学模拟 .....	182
8.3.1 焊接熔池的流体特点与基本假设 .....	182
8.3.2 焊接熔池控制方程 .....	183
8.4 等离子-MIG 复合焊熔池流体力学模拟实例 .....	184
8.4.1 问题描述 .....	184
8.4.2 问题分析 .....	185
8.4.3 复合焊接电弧-熔池流体力学模拟过程 .....	186
附录 .....	197
参考文献 .....	198

# 第 1 章

## 绪 论

焊接过程是一个涉及电弧物理、传质传热、冶金和力学行为的复杂过程。发展焊接数值模拟技术是科学认识焊接过程，使焊接这一传统工艺逐步实现由经验到科学、由定性到定量的桥梁。本章将着重介绍焊接物理过程的复杂性，以及焊接过程数值模拟的内容、意义及发展概况。

### 1.1 焊接物理过程的复杂性

焊接就物理过程本质而言是多样的、复杂的。焊接过程的复杂性一般体现在两个方面：其一，焊接方法本身具有多样性；其二，焊接过程的多物理场耦合性。

焊接技术在我国有着悠久的历史，最早可以追溯到商代。到目前为止，已有不下几十种焊接方法，常见的有电弧焊、高能束焊、压焊、摩擦焊、钎焊等。现代焊接技术还在不断发展与创新，近年来出现了复合焊、超声波焊等焊接方法。不同的焊接方法其物理过程一般存在较大的差异，因此无法用一个统一的物理模型来描述焊接过程。

焊接物理过程的复杂性还体现在焊接过程往往是多物理过程耦合在一起、共同作用的过程。就某一特定焊接方法而言，其物理过程通常包括焊接热的产生、焊接热的传导、熔池流体的流动与凝固、材料微观组织演化、焊接应力与变形等诸多物理过程。这些物理过程通常耦合在一起，相互影响和支配着整个焊接过程。总体来说，可将焊接过程中涉及的物理过程分成相互耦合的四大类，即焊接热过程、焊接力学过程、焊接组织演化过程和焊接流体流动过程<sup>[1]</sup>，如图 1-1 所示。

1) 焊接热过程。一般地，除了冷焊等几个特殊的焊接过程外，都需要对工件某一部分进行加热，从而完成焊接过程。焊接热过程包括焊接热的产生过程（不同的焊接方法其产热机理不同，甚至存在较大差异），以及焊接热在工件与周围环境中的传递过程。焊接热过程是产生后续焊接物理过程的前提和基础。

2) 焊接力学过程。焊接力学过程包含焊接过程中内应力的产生与演化、焊后的残余应力与变形等内容。

3) 焊接组织演化过程。在焊接热的作用下,部分材料发生了由固态熔化为液态再凝固成固态的过程,在某些材料中还会发生固态的相变过程,这些都属于焊接组织演化过程。

4) 焊接流体流动过程。焊接流体流动过程一般包括熔池液态金属的流动过程和电弧等离子体的流动行为等。

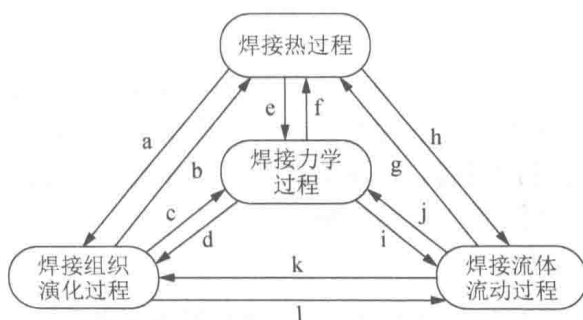


图 1-1 焊接物理过程

这 4 个物理过程往往耦合在一起,共同作用在焊接材料体上,决定和支配着整个焊接过程,它们之间的耦合关系还可分解为图 1-1 所示的若干分支过程。

a 焊接热过程引起材料组织的改变和相变过程。

b 组织的改变及相变过程通过放出或吸收潜热影响着焊接热过程。

c 相变过程往往伴随着材料体积的变化,进而影响着材料内部应力的演化进程。

d 部分相变过程还依赖于材料体所处的应力状态,如应力-诱导马氏体相变过程等。

e 焊接热行为影响焊接的力学行为,如焊接温度的改变会产生热变形和热应力,进而影响材料体的力学过程。

f 材料在发生较大的塑性变形过程中会产生塑性变形热,进而对焊接热过程产生影响。例如,在搅拌摩擦焊过程中,材料剧烈的塑性变形产热是其焊接热的主要来源之一。

g 电弧等离子体与熔池液态金属的流动行为均会影响传热过程,进而对整体的焊接热行为产生影响。

h 焊接的不均匀加热行为也是导致电弧及熔池流体流动的驱动力之一。

i 电弧及焊接熔池液态金作为一种导电的磁流体,其在运动过程中会受到电磁力的作用。

j 带电流体的流动也会产生力的作用。

k 熔池的流体流动行为会对焊缝的凝固过程产生影响，进而影响微观组织相变过程。

1 焊缝的凝固行为也会对熔池的流体流动产生影响。

由上可见，焊接过程是一个多物理场耦合的复杂过程。数值模拟技术正是深入理解焊接现象，科学、精确指导焊接设计的一个得力工具。

## 1.2 数值模拟的基本概念与步骤

数值模拟是指采用一组控制方程来描述一个物理过程或一个物理过程的某一方面，并运用数值方法求解，以获得对该过程的定量认识。

鉴于焊接物理过程的多样性和复杂性，将所涉及的所有物理过程同时进行模拟是非常困难的，也是不现实的。人们常常选取所关心的某一物理过程进行有针对性的模拟计算。例如，只关心焊接中的温度分布，可进行焊接温度场模拟计算；只关心焊接熔池的内部流动及凝固过程，可进行熔池流体力学及凝固过程的模拟等。

针对某一物理过程进行数值模拟一般要遵从以下步骤。

- 1) 建立模型。
- 2) 建立控制方程。
- 3) 离散求解方程。
- 4) 表述结果。

其中，建立模型一般是指要建立反映事物本质的数学模型。具体说就是要建立反映问题各量之间关系的微分方程及相应的定解条件。这是数值模拟的出发点。没有正确完善的数学模型，数值模拟就无从谈起。在实际焊接数值模拟应用过程中，依据所关心的问题，选取主要因素，忽略次要因素，进行一定的简化也是非常必要的。

控制方程（描述方程）一般包括对所加载荷、边界条件的控制方程，以及受载对象的本构响应方程等。建立控制方程是进行焊接数值模拟的前提和关键所在。例如，要进行焊接温度场计算，首先应对焊接热的输入及热在工件中的传播给出控制方程。

离散求解方程指的是用数值方法进行求解，从而得到想要得到的变量结果的过程。

表述结果是指在模拟计算完成之后，对结果变量进行显示、甄别、判断与分析的过程。

在商业化数值模拟软件高度发展的今天，大多数常见的控制方程已固化到软件中，用户无须关心方程的数值求解过程，其计算和求解只在软件内部执行。

### 1.3 数值方法与数值模拟软件

数值方法（数值分析）使用计算机程序来求解数学模型的近似解，采用数值方法来求解控制方程是数值模拟过程中的关键一环。常用的数值解法有有限差分法、数值积分法、蒙特卡罗法、有限元法、有限体积法等。这些数值方法在工程应用中各有所长，常常相互交叉和渗透。

有限差分法是应用最早、比较成熟的数值方法。该方法将求解域划分为差分网格，用有限个网格节点代替连续的求解域。其求解的基础是用差商代替微商，即采用泰勒级数展开等方法，把控制方程中的导数用网格节点上的函数值的差商代替进行离散，相应地就把微分方程变成差分方程来求解。有限差分法的优点在于对于具有规则几何特性和均匀材料特性的计算过程，其程序设计和计算相对简单，易于掌握理解。在焊接数值计算中，有限差分法常用于焊接热传导、熔池流体力学、氢扩散等过程的数值模拟。

数值积分法用在原函数难以找到的微积分计算中。常用的数值积分法有梯形公式、辛普森公式、高斯求积法等。

蒙特卡罗法又称随机模拟法，是一种采用抽样理论近似求解数学问题或物理问题的方法。该方法通过随机赋值而由大量随机过程获得统计结果。蒙特卡罗法常用来求解一般数值方法无法解决的问题，在焊接数值模拟中的熔池凝固及晶粒长大过程常采用蒙特卡罗法模拟。

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，由于所依据理论的普遍性，目前几乎适用于求解所有连续介质和场的问题。该方法求解的基础是变分原理及加权余量法，具体求解过程是把计算域划分为有限个互不重叠的单元，在每个单元内，选择一些合适的节点作为求解函数的插值点，将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式，借助于变分原理或加权余量法，将微分方程离散求解。有限元法的优点是求解能力强，可以比较精确地模拟各种复杂曲面的边界；网格划分比较随意，可以统一处理多种边界条件；离散方程形式规范，便于计算机编程。因此，有限元法在固体力学领域的数值计算方面取得了巨大的成功，但是在应用于流体流动过程计算时却遇到了一些困难。其原因仍可归结为按加权余量法推导出的有限元离散方程只是对原微分方程的数学近似，当处理流动和传热问题的守恒性、强对流

和不可压缩条件等方面的要求时,有限元离散方程中的各项还无法给出合理的物理解释。因此,在当前的焊接数值模拟领域中,有限元法广泛应用于模拟除流体流动过程以外的物理过程,如焊接热传导、焊接热弹塑性应力和变形分析、焊接结构的断裂力学行为等。

有限体积法又称为控制体积法,是20世纪60~70年代逐步发展起来的一种主要用于求解流体流动和传热问题的数值计算方法。其基本思路是将计算区域分为一系列不重复的控制体积,并使每个网格点周围有一个控制体积,将待解的微分方程对每一个控制体积积分,便得出一组离散方程。其中的未知数是网格点上变量的数值。有限体积法的基本思路易于理解,并能得出直接的物理解释。离散方程的物理意义是控制体积的能量平衡,也就是变量在有限大小的控制体积中的守恒原理,如同微分方程表示因变量在无限小的控制体积中的守恒原理一样。有限体积法是当前流体流动问题求解中最有效的数值计算方法,在焊接数值模拟领域常用于涉及流体力学的电弧形态及焊接熔池流动等过程的模拟。

当前,常用的模拟焊接过程的有限元软件有 ANSYS、ADINA、Abaqus、Marc 和 SYSWELD 等几个比较知名的软件系统,其中 ANSYS、ADINA、Abaqus 与 Marc 软件都是大型通用有限元软件,具有广泛的用户群体,与其他 CAD、CAE 软件的接口也比较丰富;ANSYS 进入国内比较早,其与 ADINA 软件在分析多物理场耦合时有优势;Abaqus 与 Marc 系出同门,在非线形分析方面具备较强的二次开发能力,在国外科研院所及高校中应用得比较广泛;SYSWELD 软件是专门用于分析焊接与热处理过程的有限元软件,可在分析温度场、应力场与变形的同时进行焊接冶金过程的分析。其他还有擅长疲劳分析的 Msc Fatigue 软件、擅长流场分析的 Fluent 软件等。

## 1.4 焊接数值模拟的内容

焊接数值模拟技术已经遍及焊接领域的各个方面,主要包括以下几个方面<sup>[2]</sup>。

- 1) 工件温度场分析。
- 2) 焊接熔池液体流动的数值模拟。
- 3) 焊接电弧形态及焊接电弧物理的数值模拟。
- 4) 焊接组织相变及接头组织性能预测的数值模拟。
- 5) 焊接应力与变形的数值模拟。
- 6) 焊接过程中的氢扩散的数值模拟。
- 7) 特种焊接过程的数值模拟。

### 8) 焊接接头力学行为的数值模拟。

其中, 工件温度场分析、焊接应力与变形、焊接过程中的氢扩散、特种焊接过程及焊接接头力学行为等的数值模拟都可应用有限元法进行求解, 而焊接电弧、焊接熔池流体流动等的数值模拟一般要涉及流体力学, 因此采用有限体积法较为方便。焊接组织相变的数值模拟可涉及从微观、介观到宏观的多个计算尺度, 对于微观、介观尺度下的相变与组织转变过程的模拟, 常采用分子动力学方法、相场法、蒙特卡罗法及元胞自动机等方法, 而对于接头宏观上组织含量的模拟, 有限元法也有所涉及。

本书主要介绍应用有限元法、有限体积法对焊接过程诸多方面进行数值模拟的理论及软件实现过程, 而其他涉及微观模拟的内容不在本书的讨论范围内。

## 1.5 焊接数值模拟的意义与发展概况

焊接数值模拟的意义在于, 通过对复杂或不可观察的现象和过程进行定量分析和极端情况下尚不知规则的推测和预测, 实现对复杂焊接现象的模拟, 不但有助于认清焊接物理过程, 还可以优化焊接工艺和结构设计, 减少实验工作量, 从而提高焊接生产效率<sup>[3]</sup>。

焊接数值模拟技术是伴随着计算机技术和数值计算方法的发展而逐步诞生和发展起来的, 也是伴随着非线性有限元计算技术的成熟而发展成熟起来的。最初的有限元计算方法只适用于线弹性结构分析, 而焊接过程是一个高度非线性的复杂过程, 这给焊接过程的数值模拟带来了非常巨大的困难。Marcal 在他的综述文章中感慨: 焊接过程也许是结构力学过程中非线性最强的<sup>[4]</sup>。最早的焊接过程数值模拟见于 19 世纪 70 年代, 日本大阪大学的 Ueda<sup>[5]</sup>及美国布朗大学的 Marcal 与 Hibbitt<sup>[6]</sup>率先将材料的非线性及几何的非线性纳入焊接热-力耦合计算过程中。随后, Marcal 创立了第一个非线性商业有限元程序——Marc, 他的博士生 Hibbitt 也与其他人 (Karlsson 和 Sorenson) 合作建立了 HKS 公司, 并发布了 Abaqus 非线性有限元软件, 使 Abaqus 商业软件进入市场。可以说非线性有限元软件的出现为焊接过程的数值模拟提供了重要的技术基础, 极大地推动了焊接数值模拟技术的发展。

在 Ueda 等前人创新性工作的基础上, 2005 年, Goldak 编写的 *Computational Welding Mechanics*<sup>[7]</sup> 一书的出版标志着一个新兴学科分支——计算焊接力学 (Computational Welding Mechanics, CWM) 的建立。计算焊接力学是通过计算机和数值解法来求解焊缝及近缝区连续介质力学问题的一门交叉学科。其整合了焊



接过程数值模拟中的三大物理场——热场、应力应变场及微观组织相变场之间的耦合关系，并在随后的几十年中得到快速发展，但在初期，计算焊接力学并未将焊接流体场计算包含在内。目前，计算焊接力学已发展成一门涉及计算流体力学、磁流体动力学、热力问题、计算材料科学的综合性交叉学科。

近年来，国内外对焊接数值模拟技术的应用进行了很多研究并取得了不少成果。继 Ueda、Goldak 的开创性工作之后，Lindgren<sup>[8]</sup>全面总结了计算焊接力学领域的发展，并对计算焊接力学的内涵及其应用进行了进一步的阐述。在焊接热-力模拟方面，Bergheau 等<sup>[9]</sup>使用黏塑性模型作为材料模型来精确模拟材料在高温时的黏性行为，并就其对焊接残余应力与变形的影响进行了分析。Vincent 等<sup>[10]</sup>基于 Satoh 实验，精确测定了材料在多次热循环连续作用下的黏塑性行为及记忆效应，并将其用于材料的多道焊模拟。在电弧熔池流体模拟方面，Lu 等<sup>[11]</sup>通过建立电弧-熔池统一模型，对电弧能量分布及熔池几何形状进行了模拟计算。在焊接微观组织模拟方面，Thiessen 等<sup>[12]</sup>将相场法引入焊接模拟，在得到焊接热、力场的同时给出了较为精确的材料微观组织分布等。

国内从 20 世纪 80 年代开始焊接数值模拟的研究工作。80 年代初期，西安交通大学和上海交通大学率先开展了焊接热弹塑性理论及数值计算方面的研究工作。90 年代，上海交通大学携手日本大阪大学对三维焊接应力和变形问题进行了共同研究，提出了改善计算精度和收敛性的若干途径，开发了相关三维焊接程序并有不少成功实例。近年来，山东大学在电弧物理及熔池流动行为方面，哈尔滨工业大学、南京航空航天大学在焊接微观组织演化方面，清华大学在等效焊接热源模型方面，天津大学在固有应变法研究等方面均做出了卓有成效的研究。

近年来，焊接数值模拟计算软件也得到了较快的发展，除了 Abaqus、ANSYS 等通用软件可以进行焊接模拟外，还出现了如 SYSWELD、Simufact、Sorpas 等专用焊接模拟软件，极大地方便了焊接工程技术人员和研究者从事焊接过程模拟方面的研究。目前，我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，还有较大差距。随着我国制造业强国地位的进一步稳固，随着焊接生产方式逐渐向精细、智能、柔性转变，焊接过程数值模拟技术在我国将具有广阔的应用前景。