



# 焊接过程的数值模拟

金成 编著

非  
外  
借



科学出版社

(TG-0280.0101)

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

ISBN 978-7-03-05510



9 787030 551030 >

定价：85.00元

# 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</b>	<b>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</b>	<b>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。

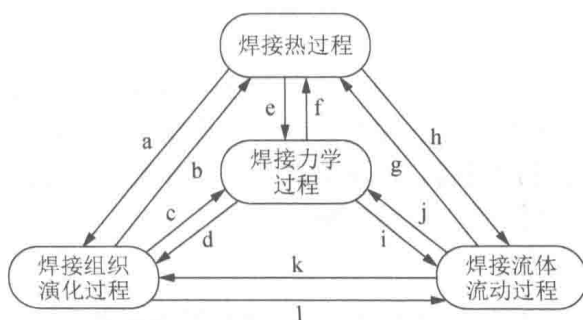


图 1-1 焊接物理过程

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,在非线性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。

## 第 2 章

# 焊接物理过程基础

要对某一物理现象进行数值模拟，首要的任务是搞清楚这一物理过程的物理本质，并对此物理过程进行数学描述。焊接过程涉及的物理现象非常复杂，以至于没有哪一个数学公式可以完全描述其整个物理过程。本章将从几个不同的侧面对焊接过程涉及的主要热、力、组织相变及流体流动等物理过程进行介绍，为焊接过程的数值模拟提供必要的理论基础。

### 2.1 焊接热过程

除了冷压焊等个别的焊接过程以外，大部分焊接过程需要对焊接区域进行加热，使其达到或超过材料的熔点（如熔焊）或热塑性温度（如固相焊接），并在随后的冷却过程中形成焊缝和焊接接头。这种加热和冷却的过程称为焊接热过程，它是所有焊接后续过程（如冶金、凝固、组织性能和应力变形等）的前提。

以常见的电弧焊为例，焊接的热过程具有如下特点。

1) 局部集中性。焊接热源一般只集中作用于加热点及其邻近区域，温度梯度大，加热和冷却都极不均匀。

2) 热源的运动性。焊接过程中热源一般是相对于工件运动的，工件受热区域不断变化。当焊接热源接近工件某一点时，该点温度迅速升高，而当热源逐渐远离时，该点又冷却降温。

3) 焊接热过程的瞬时性。在高度集中热源作用下，焊接过程的加热速度极快（可达  $1800\text{K/s}$ ），即在极短的时间内把大量的热能由热源传递给工件，而加热的局部集中性和热源的运动性又使冷却速率也很快。与铸造等的热过程相比，焊接热过程具有瞬时性。

4) 焊接热过程的复合性。焊接熔池中的液态金属处于强烈的搅拌运动状态。在熔池内部，传热过程以流体对流为主；而在熔池外部，传热过程以固体导热为主。此外，工件与外部空间还存在对流换热及辐射换热。可见，焊接热过程具有复合性。

对焊接的热过程进行分析描述，一般可从焊接热源与焊接传热两方面进行。

### 2.1.1 常用焊接热源及热效率

焊接热源是实现焊接的基本条件。从性质上看，实现材料焊接所需要的能量包括电能、化学能、机械能和光辐射能等。

#### 1. 常用焊接热源<sup>[13]</sup>

1) 电弧：电弧是最常见的焊接热源，其利用气体介质中放电产生的电弧作为热源，如焊条电弧焊、埋弧焊、二氧化碳（CO<sub>2</sub>）气体保护焊、钨极惰性气体保护焊（简称 TIG 焊）、熔化极惰性气体保护焊（简称 MIG 焊）等。电弧产生的热量通过热传导、对流、辐射等方式传递到工件上。

2) 电阻热：利用电流通过导体时产生的电阻热作为焊接热源，如电阻点焊和电渣焊等。前者利用工件金属本身电阻产生的电阻热进行焊接，后者利用液态焊渣的电阻产生的电阻热进行焊接。

3) 等离子束：将电弧放电或高频放电形成的等离子体通过一个水冷喷嘴引出形成等离子束电弧，通过电磁压缩作用和热压缩作用使等离子束具有较高的能量密度和极高的温度。

4) 电子束：在真空高压场作用下，高速运动的电子经过聚焦形成高能密度电子束，当它猛击金属表面时，电子动能转化为热能，这种热源焊接方法即电子束焊。电子束能量密度达  $10^7 \text{ W/mm}^2$ 。

5) 激光束：利用经聚焦后具有高能量密度的激光束作为焊接热源，如 CO<sub>2</sub> 激光和 YAG 激光。激光束能量密度达  $10^4 \sim 10^6 \text{ W/mm}^2$ 。

6) 电磁感应：利用涡流原理和变压器原理实现感应加热。涡流原理即将导电工件置于通以高频电流的感应线圈的感应磁场内，靠物体内部感应出的涡流使物体直接产生热量。

7) 化学热：利用可燃气体燃烧反应热或铝镁热剂的化学反应热来进行焊接，如以氧乙炔焰为热源的气焊、铝热剂焊和镁热剂焊等。

8) 摩擦热：摩擦是机械能高效转换为热能的一种方式，如摩擦焊、搅拌摩擦焊等。

不同的焊接热源形式往往在产热机理上存在较大的差异，需要在数值模拟时着重考虑。

#### 2. 焊接热源的热效率

由热源产生的热量并不是全部被工件所利用，而是有一部分热量损失于周围

介质中，即工件吸收的热量要小于热源所提供的热量。从焊接热过程计算角度来看，焊接热源的热效率的准确选取是提高计算精度的先决条件。焊接热源的热效率是指单位时间内被工件吸收的有效功率与焊接热源提供的总功率的比值。

以电弧焊接为例，设焊接热源——电弧提供的总功率为 $q_0$ ，也即电弧在单位时间内放出的能量为

$$q_0 = UI \quad (2-1)$$

式中， $U$ ——电弧电压；

$I$ ——焊接电流。

假设被工件吸收的有效功率为 $q$ ，则有

$$\eta = q / q_0 \quad (2-2)$$

式中， $\eta$ ——焊接热源的热效率。

值得注意的是，焊接热源的热效率在焊接过程计算中是一个重要的参数，它直接决定热输入的大小。但是在焊接工程领域，常将“焊接热输入”直接指代成“名义热输入”，而忽略热效率，如电弧焊接中的热输入为 $UI$ ，同时将“焊接线能量”也指代成 $UI/v$ ，其中 $v$ 为焊接速度。此时，要注意“名义热输入”与“有效热输入”的区别。本书采用“有效热输入”的概念。

焊接热源的热效率可以通过实验的方法测量，其大小与焊接方法和焊接参数密切相关，因此在数值上通常为一个范围，需要读者在计算过程中选取。常用焊接热源的热效率及简要说明见表 2-1。

表 2-1 常用焊接热源的热效率及简要说明<sup>[14]</sup>

焊接方法		焊接热源的热效率 $\eta$	说明
激光焊		0.20~0.90	在热导型激光焊中，热效率与表面反射率强烈相关，光亮表面会反射大部分的入射激光；而在深熔型激光焊中，由于形成匙孔，黑体对激光的吸收率大幅提高
等离子弧焊		0.50~0.75	无光反射问题，但需要对电弧进行压缩使其形成等离子体，一般需要对焊炬进行冷却，会损失部分能量
TIG 焊	交流	0.68~0.85	直流正接热效率>交流热效率>直流反接热效率，这是因为 TIG 焊中电子轰击是加热工件的主要能量来源。处于直流正接时，电子全周期轰击工件，效率最高；在交流焊中只有工件处于电流正半周时才能有效加热工件，效率次之；处于直流反接时，电子更多地轰击电极而不是工件，因此热效率最低
	直流	0.78~0.85	
MIG 焊	钢	0.66~0.69	由焊丝充当电极，熔化的焊丝通过熔滴过渡的形式将热量带入工件，热效率较 TIG 焊高
	铝	0.70~0.85	
熔化极活性气体保护焊(简称 MAG 焊)		0.75~0.90	活性气体的加入提高了电弧稳定性、改善了熔滴过渡、增大了电弧的热功率

续表

焊接方法	焊接热源的热效率 $\eta$	说明
焊条电弧焊	0.77~0.87	交流焊条电弧焊的效率要小于直流焊的效率
电渣焊	0.83	电渣焊时, 由于熔池处于厚大件的中间, 热量主要损失于强制焊缝的冷却滑块
埋弧焊	0.77~0.90	焊弧在熔剂中“燃烧”从而避免了热量散失, 热效率较高
电子束焊	0.80~0.97	能量高度集中, 熔化金属形成黑体, 热量吸收效率非常高

## 2.1.2 焊接热源模型

焊接热源模型是指对作用于工件上的、在时间域和空间域上的热输入分布的一种数学描述<sup>[15]</sup>。在焊接数值模拟过程中, 焊接热源模型是以一个热输入边界条件(或热载荷)的形式加入数值分析模型中的。在实际应用过程中, 热输入一般可用温度、生热率或热流密度等来表示。

以弧焊热源为例, 在不考虑起弧、熄弧及电弧的周期性燃烧、熄灭等不稳定因素的条件下, 可将电弧的热输入行为等效为一个静态的过程, 以此建立的热输入在空间域上的分布规律称为静态焊接热源模型。正因为焊接数值模拟中热源模型的基础性、必要性和重要性, 所以自焊接数值模拟(包括解析计算)从研究开始至今出现了许多焊接热源模型<sup>[16-19]</sup>, 它们均有各自不同的适用性。例如, 高斯(Gauss)平面热源、半球形体热源、椭球形体热源、双椭球形体热源、圆柱体热源、圆锥体热源、指数衰减体热源等。

目前的焊接热源模型按其在空间分布形状的不同大致可分为面热源模型、体热源模型和组合热源模型等<sup>[20]</sup>。下面介绍表面高斯分布热源模型和体热源模型。

### 1. 平面高斯分布热源模型

研究表明, 在电弧、高能束流和火焰焊接时, 若熔深较浅, 其热流密度在受热表面呈正态(高斯)分布特征, 其热流分布如图 2-1 所示。

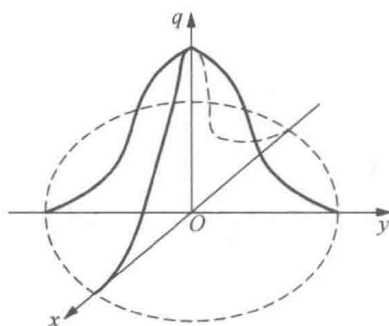


图 2-1 平面高斯分布热源模型

焊接热源把热能传给工件是通过工件上一定的作用面积进行的, 这个作用面积称为加热区。对于电弧焊, 绝大多数热流通过工件上一个微小的加热区传入工件, 这个加热区的面积称为有效加热面积。假设加热区的形状为圆形, 其半径为  $R_0$ , 则在加热面上的热流分布可用高斯(或正态)分布函数来描述:

$$q(r) = q_m \exp(-Kr^2) \quad (2-3)$$

式中,  $q(r)$ ——距离热源中心  $r$  处的热流密度;

$q_m$ ——热源中心处的最大热流密度;

$K$ ——热流集中系数;

$r$ ——距热源中心的距离。

根据能量守恒定律, 输入工件的有效功率  $\Phi$  可用热流密度函数的积分表示:

$$\Phi = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} q_m \exp(-K(x^2 + y^2)) dx dy \quad (2-4)$$

积分得

$$q_m = \frac{K}{\pi} \Phi \quad (2-5)$$

在电弧焊中, 将有效功率  $\Phi = \eta UI$  代入式(2-3), 整理可得

$$q(r) = \frac{K\eta UI}{\pi} \exp(-Kr^2) \quad (2-6)$$

热流集中系数  $K$  代表热源的集中程度,  $K$  值越大则表示热源分布越集中。如所有热流均匀地分布在一个半径为  $R_0$  的圆形内, 则  $K = \frac{1}{R_0^2}$ 。

热流集中系数  $K$  一般不容易直接测量, 实践中也常用热源有效加热半径  $R_0$  来表示热源的集中情况。热源有效加热半径指的是工件表面上电弧笼罩圆形区域的半径, 如假设在半径  $R_0$  处, 热流密度衰减为热源中心最大热流密度值的 5%, 即

$$q(R_0) = 0.05q_m = q_m \exp(-KR_0^2) \quad (2-7)$$

由此可得

$$K = \frac{\ln 20}{R_0^2} \approx \frac{3}{R_0^2} \quad (2-8)$$

这样, 式(2-6)可变形为

$$q(r) = \frac{3\eta UI}{\pi R_0^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{R_0^2}\right) \quad (2-9)$$

由于有效加热半径  $R_0$  较热流集中系数  $K$  在物理意义上更为直观, 因此在实际模拟计算中常使用式(2-9)作为表面高斯分布热源模型。 $R_0$  与  $K$  的值取决于焊

接方法和焊接参数，它们之间的换算关系为

$$R_0 = \sqrt{\frac{3}{K}}$$

不同焊接方法的  $K$  与  $R_0$  参考值见表 2-2。

表 2-2 不同焊接方法的  $K$  与  $R_0$  参考值

焊接方法	$K/\text{mm}^{-2}$	$R_0/\text{mm}$
焊条电弧焊	0.12~0.14	4.6~5
埋弧焊	0.06	7
TIG 焊	0.03~0.07	2~10
CO <sub>2</sub> 气体保护焊	0.047~0.48	2.5~8
MAG 焊	0.018~0.48	2.5~13
气焊	0.0017~0.0039	27~42

## 2. 体热源模型

对于熔深比较浅的焊接过程，采用表面高斯分布热源模型可以得到较好的模拟结果，但对于具有较大熔深的弧焊或高能束焊，焊接热源的热流密度不只作用在工件表面上，在工件厚度方向上热流的作用也比较显著，此时，采用体热源模型模拟更适合。按照体热流密度分布形状，又可将体热源模型分为半球形体热源模型、椭球形体热源模型、双椭球形体热源模型及旋转体热源模型。

### (1) 半球形体热源模型

半球形体热源在形态上为一半球体，其热源分布函数可表示为

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}\Phi}{c^3\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2 - 3y^2 - 3z^2}{c^2}\right) \quad (2-10)$$

式中， $x$ ——与热源中心  $x$  方向上的距离；

$y$ ——与热源中心  $y$  方向上的距离；

$z$ ——与热源中心  $z$  方向上的距离；

$c$ ——半球体半径。

这种球形分布函数也有一定的局限性，其只适用于模拟静态或焊速较慢的电弧热输入。在实际焊接过程中，如果焊炬移动速度较快，熔池通常不是球对称的，为了改进这种模式，提出了椭球形体热源模型。

### (2) 椭球形体热源模型

椭球形体热源在形态上为一椭球体，其热源分布函数可表示为



$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}\Phi}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-3\frac{x^2}{a^2} - 3\frac{y^2}{b^2} - 3\frac{z^2}{c^2}\right) \quad (2-11)$$

式中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ——椭球体 3 个方向的半轴长。

在应用椭球形体热源分布函数计算时可以发现, 椭球前半部分的温度梯度不像实际中那样陡变, 而椭球后半部分的温度梯度分布较缓。为克服这个缺点, Goldak 提出了双椭球形体热源模型。

### (3) 双椭球形体热源模型

如图 2-2 所示, 双椭球形体热源模型由前后两个 1/4 椭球结合而成, 前半部分作为一个 1/4 椭球, 后半部分作为另一个 1/4 椭球。双椭球形体热源的形状参数共有 4 个, 即  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b$  和  $c$ 。若设前半部分椭球的能量分配系数为  $f_1$ , 后半部分椭球的能量分配系数为  $f_2$ , 且有  $f_1 + f_2 = 2$ , 则前半部分椭球内的热源分布函数:

$$q_1(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_1\Phi}{a_1bc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_1^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), \quad x \geq 0 \quad (2-12)$$

后半部分椭球内的热源分布函数:

$$q_2(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_2\Phi}{a_2bc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_2^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), \quad x < 0 \quad (2-13)$$

总的热流密度为

$$q(x, y, z) = q_1 + q_2 \quad (2-14)$$

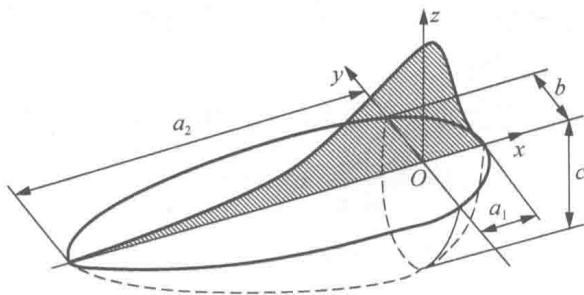


图 2-2 双椭球形体热源模型

双椭球形体热源模型是比较常用的焊接热源模型, 能够较好地模拟金属材料电弧焊接时的温度场分布和熔池的几何形状。

### (4) 旋转体热源模型

在一些深熔焊(如高能束流焊等)的焊接过程中, 焊接熔池一般呈圆柱体、锥体等旋转体形态。描述这种形态的体热源即为旋转体热源模型, 如高斯柱体热源的分布函数可以表示为

$$q(r, z) = \frac{3\Phi}{\pi r_0^2 h} \exp\left(\frac{-3r^2}{r_0^2}\right) \cdot u(z) \quad (2-15)$$

式中,  $r_0$ ——热源有效作用半径;  
 $r$ ——距离柱体轴线的距离;  
 $h$ ——热源作用深度;  
 $H$ ——工件厚度;

$$u(z) \text{——单位阶跃函数, } u(z) = \begin{cases} 1, & 0 \leq z \leq h \\ 0, & h \leq z \leq H \end{cases}$$

由式(2-15)可知, 高斯柱体热源的径向热流呈高斯分布, 而在柱体深度方向上则均匀分布, 适合于模拟深度方向热流分布较为一致的深熔焊。然而, 从多数深熔焊焊缝截面特征可以看出, 大多数焊缝形貌呈开口较大而内部逐步收敛的漏斗形, 随着深度的增加, 能量逐渐衰减。因此, 通常考虑使用深度方向峰值热流衰减的高斯柱体热源, 如式(2-16)所示。

$$q(r, z) = \frac{3\Phi}{\pi r_0^2 h} \exp\left(\frac{-3r^2}{r_0^2}\right) \cdot u(z) \cdot D(z) \quad (2-16)$$

式中,  $D(z)$ ——峰值热流衰减函数。

峰值热流衰减函数可以有多种形式, 包括线性衰减、二次型衰减、指数衰减等。峰值热流衰减函数控制了能量沿工件深度方向的衰减方式及衰减速度, 从而控制了热流在深度方向各层的分配量, 进而影响熔池形状和整个焊接温度场。

但是, 在实际应用过程中, 由深熔焊的焊缝截面形状反推峰值热流衰减函数  $D(z)$  并不十分容易, 给热源模型的校核带来困难, 因此常根据焊缝截面采用图 2-3 所示三维倒锥体热源模型来校核锥状体热源<sup>[21]</sup>。

三维倒锥体热源分布函数可表示为

$$q(r, z) = \frac{9\Phi e^3}{\pi(e^3 - 1)} \cdot \frac{\exp\left(\frac{-3r^2}{r_0^2}\right)}{(z_e - z_1)(r_e^2 + r_e r_1 + r_1^2)} \quad (2-17)$$

$$r_0(z) = r_1 + (r_e - r_1) \frac{z - z_1}{z_e - z_1} \quad (2-18)$$

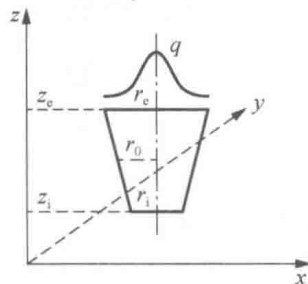


图 2-3 三维倒锥体热源模型

式中,  $e$ ——自然常数;

$z_e$ 、 $z_1$ ——倒锥体上下表面厚度方向坐标;

$r_e$ 、 $r_1$ ——倒锥体上下表面有效加热半径;

$r_0(z)$ ——随厚度方向衰减的加热半径值。

### 2.1.3 焊接温度场及传热定律

#### 1. 焊接温度场

物体内各点的实时温度集合称为温度场。它是时间和空间坐标的函数，通常记作  $T=(x, y, z, t)$ 。温度场分两大类。一类是稳态工作条件下的温度场。这时，物体各点的温度不随时间变动，这种温度场称为稳态温度场（或定常温度场）。另一类是变动工作条件下的温度场。这时，温度分布随时间改变，这种温度场称为非稳态温度场（或非定常温度场）。

焊接温度场是指焊接加热及随后冷却过程中工件内各点温度的实时分布。通常情况下，焊接温度场是一个急剧变化的非稳态温度场。

#### 2. 焊接传热基本定律

描述热传导现象的基本定律是傅里叶定律，其基本形式为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2-19)$$

式中， $T$ ——质点温度；

$t$ ——时间；

$\lambda$ ——导热系数；

$c$ ——比热容；

$\rho$ ——密度。

#### 3. 对流换热定律

对流是指流体各个部分之间发生相对位移，冷、热流体相互掺混所引起的热量传递方式。对流仅能发生在流体中，而且必然伴有热传导现象。工程中经常遇到的不是单纯的对流方式，而是流体流过另一物体表面时，对流与热传导联合起作用的热量传递过程，这称为对流换热。焊接过程中，空气或保护气体流过工件表面，冷却水流过焊炬内部，都是对流换热的例子。

对流换热的热流密度  $q_k$  采用牛顿冷却公式计算：

$$q_k = \alpha_k \Delta T \quad (2-20)$$

式中， $\alpha_k$ ——对流换热系数 [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]；

$\Delta T$ ——流体温度与壁面温度的差值。

对流换热系数的大小与换热过程中的许多因素有关，它不仅取决于流体的物

理性质及换热表面的形状与布置，还与流速密切相关。

#### 4. 辐射换热定律

物体因热而发生向外辐射能量的现象称为热辐射。自然界中各个物体都不停地向空间发出热辐射，同时又不断地吸收其他物体发出的热辐射。辐射和吸收的综合结果即以辐射方式进行的物体间热量传递——辐射换热。当物体与周围环境温度相等时，辐射换热量等于零，这是一种动态平衡过程。根据 Stefan-Boltzmann 定律，受热物体辐射的热流密度  $q_r$  与其表面温度  $T$  的四次方成比例，即

$$q_r = \varepsilon C_0 T^4 \quad (2-21)$$

式中， $T$ ——热力学温度；

$C_0$ ——绝对黑体系数， $C_0 = 5.67\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ；

$\varepsilon$ ——物体的黑体系数。

焊接时，相对较小的工件（温度  $T$ ），在相对较宽阔的环境中（温度  $T_f$ ）冷却，通过热辐射发生的热损失可按以下公式计算：

$$q_r = \varepsilon C_0 (T^4 - T_f^4) \quad (2-22)$$

为了计算中能用统一的形式，把辐射换热的热流密度  $q_r$  和工件表面的温度落差  $(T - T_f)$  联系起来，引入辐射系数  $\alpha_r$ ，有

$$q_r = \alpha_r (T - T_f) \quad (2-23)$$

式中， $\alpha_r = \varepsilon C_0 \frac{\left(\frac{T+273}{100}\right)^3 - \left(\frac{T_f+273}{100}\right)^4}{T - T_f} [\text{J}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})]$ 。

固体表面和外界的热量交换往往同时存在对流换热和辐射换热两种形式。为了计算方便，常常引用一个总的表面换热系数  $\alpha$  来考虑这两种换热方式的综合影响，即

$$q_T = q_k + q_r = (\alpha_k + \alpha_r)(T - T_f) = \alpha(T - T_f) \quad (2-24)$$

也即

$$q_T = \alpha \Delta T \quad (2-25)$$

式中， $\alpha$ ——总的表面换热系数，它等于对流换热系数和辐射换热系数之和。

总的表面换热系数  $\alpha$  随表面温度的升高而增加，当表面温度不超过 600K 时，大部分散失热量是经对流放出的；当表面温度较高时，则主要由辐射换热放出，如在超过 1100K 时辐射的热量约占总散失热量的 80%。

## 2.2 焊接应力与材料力学本构

### 2.2.1 焊接残余应力的产生

残余应力是指在去除所有外载后残存在构件内部的应力。其一般是由加工过程引起的,如对构件进行弯曲、切削、轧制及焊接等操作时所引起的应力。构件在焊接完成后往往具有肉眼可见的变形,这说明在焊接不均匀加热和冷却作用下,由焊接过程产生的应力与应变起着重要的作用。

焊接残余应力是指构件在焊接过程结束去除外载后,残存在其内部的自平衡内应力。从计算尺度上,可以把焊接残余应力分为3个层次:宏观残余应力、细观残余应力及微观残余应力。宏观残余应力也称一阶残余应力,是指可用宏观热力学和应力-应变关系描述的应力层次,它的应力一般表现为几个晶粒的均值,尺度通常在1mm量级及以上;细观残余应力着眼于晶粒尺度,着重晶粒与周围其他晶粒之间在形成、长大及晶粒拓扑关系上产生的应力,尺度通常在 $10\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 范围内;微观残余应力考察原子间关系,通过位错、晶体缺陷等角度来描述力学关系,尺度通常在 $10\mu\text{m}$ 以下<sup>[22]</sup>。本书提到的残余应力主要指宏观残余应力。人们往往通过 Satoh 实验或三棒模型来近似说明宏观焊接残余应力的产生原理<sup>[23]</sup>。

在图 2-4 所示的三棒模型中,固定左右两根钢棒,并保持温度不变,对中间钢棒进行加热,在经历由室温加热至 873K 并冷却至室温的热循环后,中间钢棒产生了约 250MPa 的拉伸残余应力。由分析可知,在中间钢棒的升温过程中,其伸长膨胀受到旁边两根钢棒的制约而产生压缩热应力(AB段),当热应力的大小超过材料当时的屈服极限(B点)时,就会产生压缩塑性变形。另外,随着温度的升高,材料的承载能力进一步降低(BC段)。在随后的冷却过程中,中间钢棒的收缩同样会受到约束而产生拉伸应力(CD段),在拉伸应力达到材料当前屈服极限(D点)时,将产生拉伸塑性变形(DE段)。最终,当温度恢复到室温时,有部分拉伸应力残存在中间钢棒中,也就是残余应力。

焊接残余应力的产生与此模型类似,焊接同样是一个局部的不均匀加热过程,焊缝及近缝区材料在焊接热源的加热及随后的冷却过程中变形,其受到周围冷金属的制约而产生焊接残余应力。值得注意的是,一个实际的焊接过程要远比三棒模型复杂得多,其温度变化范围往往从室温到材料熔点以上,部分材料经历了固/液态转变,变化温度下材料复杂的本构关系、甚至材料中的微观组织相变都会影响最终构件的应力与变形。因此,精确地模拟焊接条件下材料的应力-应变行为是比较困难的,需要进行一定程度的简化。

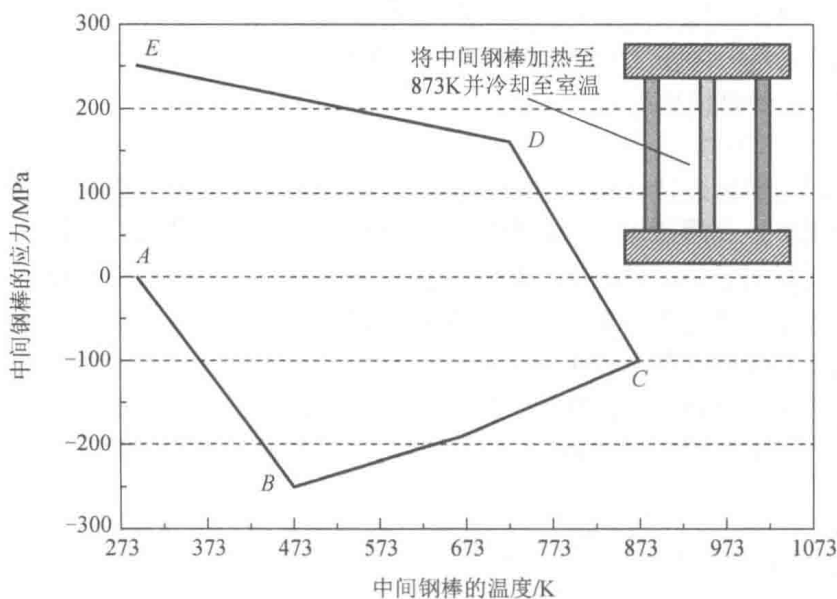


图 2-4 三棒模型示意图

目前,许多研究者采用简化的方法来计算焊接过程的力学问题。其中,热弹性法仅考虑材料与温度相关的弹塑性本构,在固体力学范畴内对力学行为进行模拟。它不考虑焊接微观组织变化,也不考虑焊缝材料经历的固/液态转变,把待焊材料看作一个连续的固体,并且忽略率相关塑性等。

## 2.2.2 材料的率无关弹塑性本构

率无关弹塑性指的是材料的塑性与变形速率无关,也即材料的黏度为零,而只考虑其弹塑性本构。

### 1. 材料的弹性本构

由材料力学可知,弹性变形是物体卸载以后就完全消失的变形。一般采用胡克定律来描述各向同性材料的弹性本构,广义胡克定律的表述如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_{11} = \frac{1}{E} [\sigma_{11} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{33})] \\ \varepsilon_{22} = \frac{1}{E} [\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})] \\ \varepsilon_{33} = \frac{1}{E} [\sigma_{33} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22})] \end{cases} \quad (2-26)$$

式中,  $\varepsilon_{11}$ 、 $\varepsilon_{22}$ 、 $\varepsilon_{33}$ ——3 个坐标轴方向的正应变;

$\sigma_{11}$ 、 $\sigma_{22}$ 、 $\sigma_{33}$ ——3 个坐标轴方向的正应力;

$E$ ——弹性模量;

$\gamma$ ——泊松比。

可见,完整地表述各向同性材料弹性的弹性本构仅需要两个参数:弹性模量  $E$  和泊松比  $\gamma$ 。在焊接过程中,材料的弹性模量会随着温度的升高而逐渐变小,当温度达到材料的力学熔点时,即材料失去承载能力,其弹性模量理论上应当为零,但在连续固体力学的模拟计算范畴内,过小的弹性模量会使计算变得难于收敛,因此在实际的计算过程中常采用较低温度下的弹性模量代替高温弹性模量。

对于常用金属材料,泊松比一般在 0.3 左右。一般而言,泊松比在焊接过程中变化不大。也有研究者认为,材料在熔化时可假设为不可压缩流体,其泊松比取 0.5。

## 2. 材料的塑性本构

焊接时由于温度较高,焊缝及其邻近区域多数进入热塑性状态,因此材料塑性模型的选择对模拟准确性至关重要。

材料的塑性变形指的是物体卸载后不能消失而残留下来的变形。一个物体塑性本构的建立,一般要从其屈服函数和塑性流动法则及硬化法则几个方面进行描述。

### (1) 屈服函数和塑性流动法则

从材料简单的拉伸实验得出的应力-应变曲线可以看出,当应力超过某一值  $\sigma_0$  时,应力-应变关系不再服从胡克定律,则可认为  $\sigma_0$  为简单拉伸条件下的屈服应力。然而这种简单的应力状态在现实中是很少见的,多数情况下其属于复杂应力状态,即某一点有 9 个应力分量,这时就需要利用屈服函数来判断材料是否达到屈服。鉴于多数金属材料都可看作米泽斯 (Mises) 材料,这里仅介绍 Mises 屈服准则,材料的 Mises 应力  $\sigma_e$  也称等效应力,等效应力与 3 个主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  的关系可表示为

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2-27)$$

当受力物体中一点的应力状态满足屈服条件而进入塑性阶段以后,需要使用塑性阶段的本构方程来描述塑性应力与应变之间的关系。塑性本构的重要特性是非线性和不唯一性。非线性指塑性阶段的应力-应变关系不是线性关系,而不唯一性指的是应变不能由应力唯一确定。当外载荷变化时,应力也要变化,在应力空间上代表应力状态的应力点就要移动,应力点移动的轨迹称为应力路径,这一过程称为应力历史。在塑性阶段,应变状态不但与应力状态有关,而且依赖整

个应力历史,或者说,应变是应力和应力历史的函数。

塑性增量理论认为,塑性应变增量  $d\varepsilon_{ij}^p$  与加载函数  $f$  之间的关系为

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2-28)$$

式中,  $\sigma_{ij}$  ——应力分量;

$\lambda$  ——塑性流动比例因子。

在塑性加载阶段,  $d\lambda > 0$ ; 在卸载和弹性阶段,  $d\lambda = 0$ , 式(2-28)称为塑性流动法则。

## (2) 硬化法则

多数金属材料在发生塑性变形时,都要发生“硬化”现象,即当发生塑性变形后,需要更大的应力来驱动塑性变形的进一步增长。基本的硬化模型包括各向同性硬化模型、随动硬化模型和混合硬化模型。

各向同性硬化是指当材料进入塑性变形以后,加载屈服曲面在各个方向上均匀扩张,但是其形状、曲面的中心及其在应力空间中的方位均保持不变,其在反向加载时的屈服应力等于正向加载的屈服应力,即随着应力的增长屈服面向各个方向扩大,如图2-5所示。

随动硬化是指当材料进入塑性变形以后,加载曲面在应力空间做刚体移动,但是加载面形状、大小及方位均保持不变,随动硬化材料在加载反向时会产生包辛格效应,即反向加载时屈服应力有所降低,屈服面会发生移动而不发生扩展,多数金属在反向加载时都会产生一定的包辛格效应,如图2-6所示。

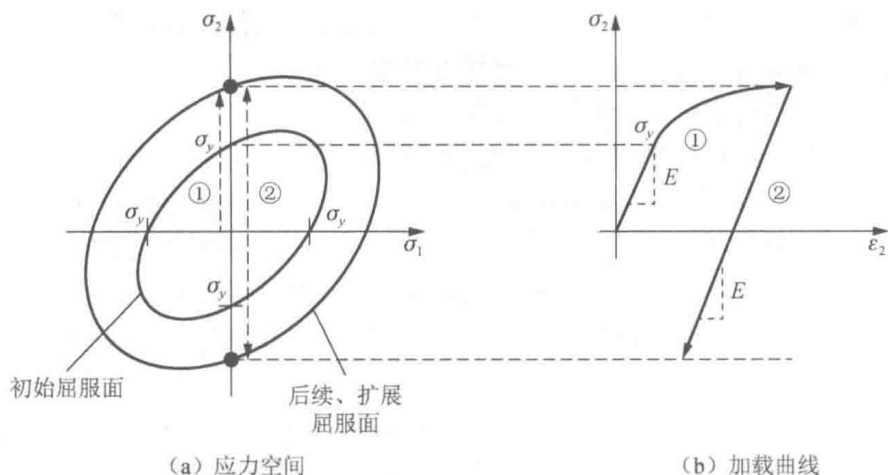


图 2-5 各向同性硬化行为的应力空间和加载曲线

① 正向加载; ② 反向加载



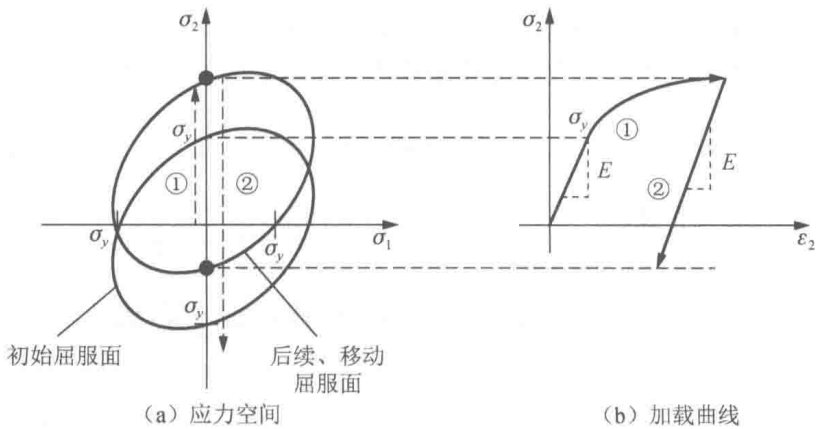


图 2-6 随动硬化行为的应力空间和加载曲线

① 正向加载；② 反向加载

混合硬化是指既包含各向同性硬化部分又包含随动硬化部分的硬化模型。在焊接模拟过程中，焊缝及近缝区材料在焊接热循环的作用下往往会经历类似上述的“拉-压”反复过程，硬化模型的选择对计算结果的影响比较大。

## 2.3 接头热影响区微观组织演化

### 2.3.1 接头微观组织演化简介

焊接过程中焊缝及近缝区金属要经历一次或多次焊接热循环作用，其中焊缝金属由熔化到凝固经历一类相变，而邻近焊接的区域即焊接热影响区虽然经历了较高的温度，但还不足以发生熔化而发生固态下的相变。

相变作为影响焊接结构力学性能的重要因素之一，越来越多地引起了人们的重视。例如，低合金钢在焊接热循环过程中，其热影响区的不同区域会发生不同的固态组织转变，产生性能各异的接头区域。不同的微观组织转变与焊接热循环参数、材料化学成分、晶粒大小及冷却速度等都有着密切的联系，而这不仅会对焊接变形和残余应力产生重要的影响，而且会明显改变结构应力-应变关系，影响焊接结构的最终使用寿命。

对于低合金钢，焊缝及焊接热影响区的力学性能主要取决于奥氏体晶粒尺寸及其转变产物。焊接能量输入产生的热循环是引起晶粒长大和焊接热影响区微观组织转变的主要因素。在焊接低合金钢时，奥氏体晶粒粗大及其脆性转变产物（如马氏体和贝氏体）的出现会导致脆性断裂的发生。此外，这些硬而脆的新相也使

接头对应力和腐蚀极为敏感,产生易引起冷裂纹的内应力,增加脆断发生的可能性。

从宏观角度来讲,接头的力学性能可以用焊接热影响区内各组成相的含量、成分及晶粒尺寸来描述。在低合金钢中,焊接热影响区的微观组织主要为铁素体(F)、珠光体(P)、奥氏体(A)、贝氏体(B)及马氏体(M)。如图2-7所示为焊接热循环下热影响区组织转变示意图。

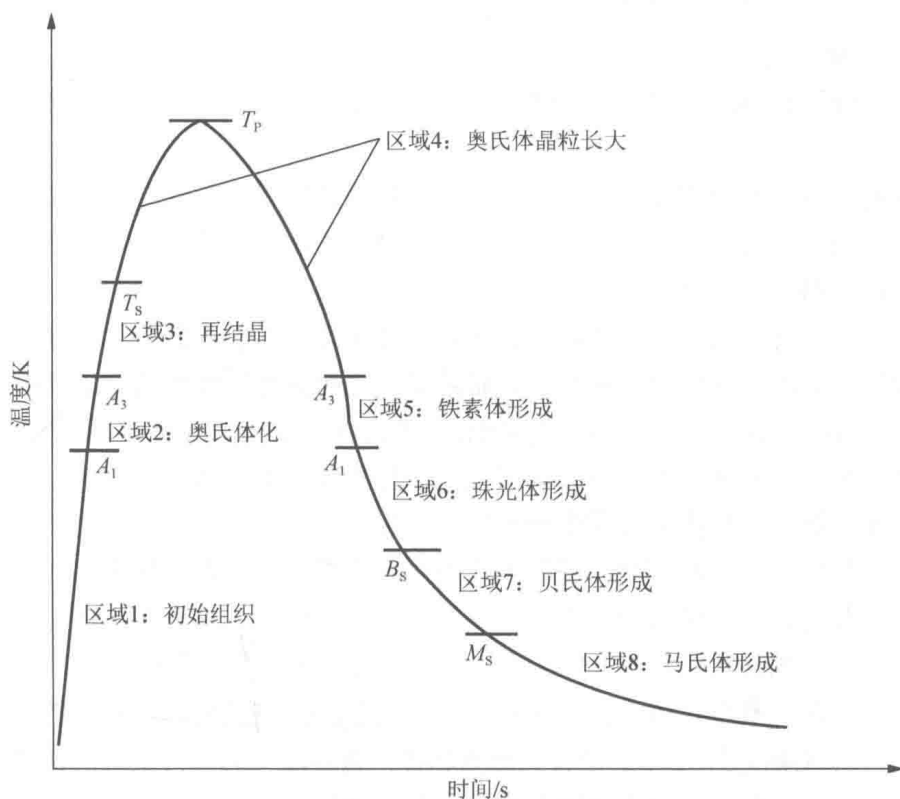


图2-7 焊接热循环下热影响区组织转变示意图

1) 区域1: 初始组织。绝大多数焊接结构钢的微观组织为铁素体+珠光体或铁素体+奥氏体+马氏体组织。

2) 区域2: 奥氏体化。当将低合金钢加热至奥氏体开始转变温度  $A_1$  或共析温度以上时,金属中的珠光体、铁素体等组织迅速转变成具有相同成分的奥氏体。直至奥氏体转变结束温度  $A_3$ ,焊缝及热影响区金属全部转换成奥氏体为止。

3) 区域3: 再结晶。金属再结晶是指将金属加热到该金属熔点的0.4倍时( $T_s$ ),金属原子获得更多的热能,使塑性变形后的金属被拉长了的晶粒重新形核、结晶,变为与变形前晶格结构相同的无应变的新晶粒的过程。

4) 区域4: 奥氏体晶粒长大。重新形核的奥氏体晶粒在继续加热到最高温度

( $T_p$ ) 及随后冷却至  $A_3$  线以上过程中持续长大。

5) 区域 5: 铁素体形成。当低合金钢缓慢冷却至  $A_3$  时, 奥氏体开始分解为铁素体, 至  $A_1$  转变结束。

6) 区域 6: 珠光体形成。当低合金钢缓慢冷却至  $A_1$  时, 奥氏体开始分解为珠光体, 至  $B_s$  转变结束。

7) 区域 7: 贝氏体形成。当低合金钢缓慢冷却至  $B_s$  时, 奥氏体开始分解为贝氏体, 至  $M_s$  转变结束。

8) 区域 8: 马氏体形成。当低合金钢缓慢冷却至  $M_s$  时, 奥氏体开始分解为马氏体。

焊接过程中的温度变化极为迅速, 相的转变取决于冷却速度、加热速度及其他因素。对于低合金钢, 可以通过对比加热峰值温度和铁碳相图平衡点来描述焊缝附近不同微观组织区域, 如图 2-8 所示。

图 2-8 左侧曲线被分为不同的区域, 显示了焊接接头热影响区各区域的峰值温度及对应组织。峰值温度曲线下方显示了从加热到达到峰值温度历经的 4 个区域 (以  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  表征) 的微观组织。在图 2-8 底部显示了冷却后的微观组织。图 2-8 右侧则是铁碳平衡相图。焊接接头热影响区是指左侧图中的  $B \sim D$  区域, 其在焊接热循环的作用下将发生固态相变。焊缝区是以焊缝金属表征的材料熔化的区域。基体材料 ( $A$  区域) 是指没有发生相变的区域。在焊接中的加热和随后的缓慢冷却过程中, 接头微观组织转变的定性描述如下: 假设基体金属是由铁素体和珠光体组成的含碳量为  $x\%$  的退火微观组织, 珠光体是铁素体和渗碳体  $Fe_3C$  的混合物 (含碳量为  $0.76\%$ ), 通过杠杆定律可以得出铁素体和渗碳体的比例。当温度上升到  $A_1$  时, 珠光体直接转变为奥氏体。随着温度的断续上升, 铁素体逐渐转变为奥氏体。奥氏体中的含碳量从共析点的  $0.76\%$  向  $x\%$  减少。当温度达到  $A_3$  时, 转变完成。 $B$  区域材料部分转变为奥氏体, 而  $C$  区域材料完全奥氏体化。 $C$  区域和  $D$  区域的区别在于后者的温度略高, 促进了晶粒的长大。在靠近熔合线区域温度会达到或超过固相线温度, 此部分区域会发生部分熔化。温度达到液相线温度的焊缝区材料将发生完全熔化。

在随后的冷却过程中, 由加热过程产生的奥氏体组织将会发生逆转变, 也就是奥氏体的分解。图 2-8 右侧是一个平衡相图, 反映的是在缓慢加热和冷却状态下的组织转变。而焊接过程中的热影响区是一个很小的区域, 通常加热速度和冷却速度都很快。此时, 冷却过程中相的改变不仅受到冷却速度的影响, 同时还会受晶粒尺寸及形成奥氏体中含碳量的影响。

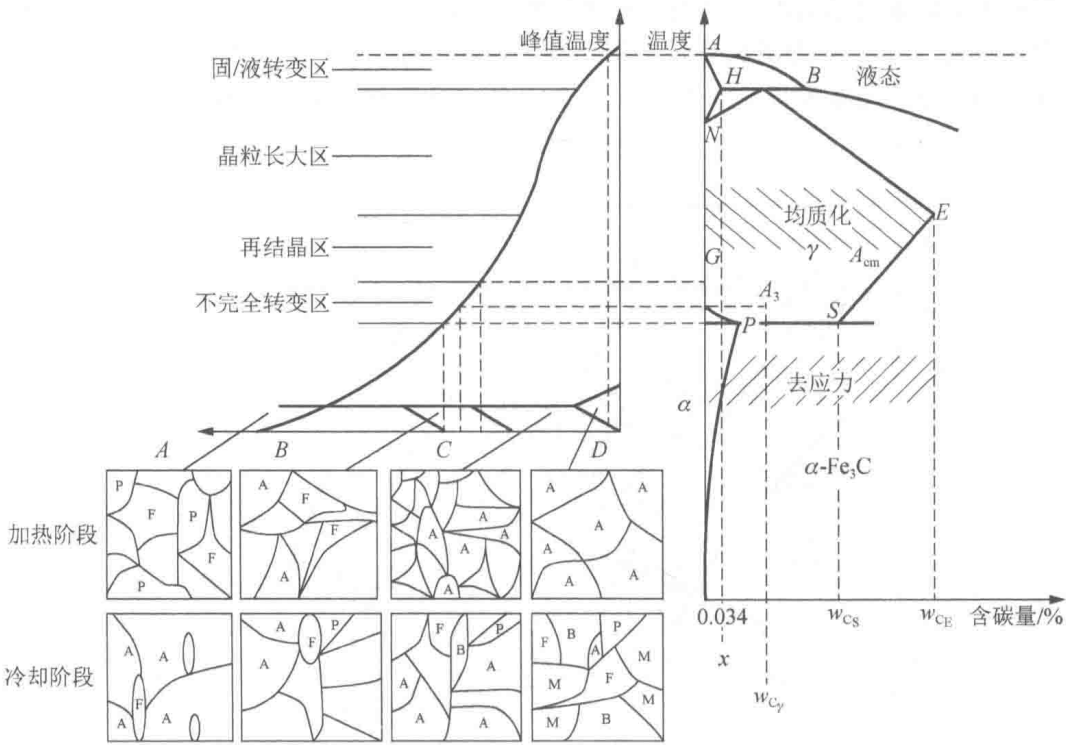


图 2-8 焊接接头热影响区典型组织转变与加热峰值温度及铁碳相图关系

### 2.3.2 相变描述方法

过冷奥氏体等温转变 (time-temperature-transformation, TTT) 曲线法和连续冷却转变 (continuous-cooling-transformation, CCT) 曲线法是描述低合金钢组织转变的两种主要方法。TTT 曲线法是在等温条件下观察不同保温时间的组织变化, 从而得出不同温度下的转变特征。CCT 曲线法是在温度-时间坐标系上标示各种冷却速度下组织转变开始、终止的温度及转变量, 各种组织开始、终止的连线构成一个完整的连续冷却转变曲线, 这种方法由于直观、实用而得到广泛使用。准确计算和测试不同低合金钢的 TTT 曲线和 CCT 曲线是利用它们进行组织预测的前提。

在焊接过程中常用 CCT 曲线来描述焊缝及焊接热影响区金属微观组织转变与温度、冷却速度之间的关系。如图 2-9 所示为低合金钢 Q345 焊接热影响区的 CCT 曲线。A、F、P、B、M 分别代表奥氏体组织区域、铁素体组织区域、珠光体组织区域、贝氏体组织区域和马氏体组织区域。 $A_1$  为连续加热过程中奥氏体转变开始线,  $A_3$  为连续加热过程中奥氏体转变终了线;  $fe$  为连续冷却过程中奥氏体

开始析出铁素体的曲线， $gl$  为奥氏体开始析出珠光体的曲线， $hs$  为奥氏体析出珠光体结束曲线， $ph$  为奥氏体析出贝氏体的曲线， $dpq$  为马氏体开始转变曲线 ( $M_s$  线)， $pq$  为贝氏体转变结束曲线， $mn$  为马氏体转变结束曲线 ( $M_f$  线)。

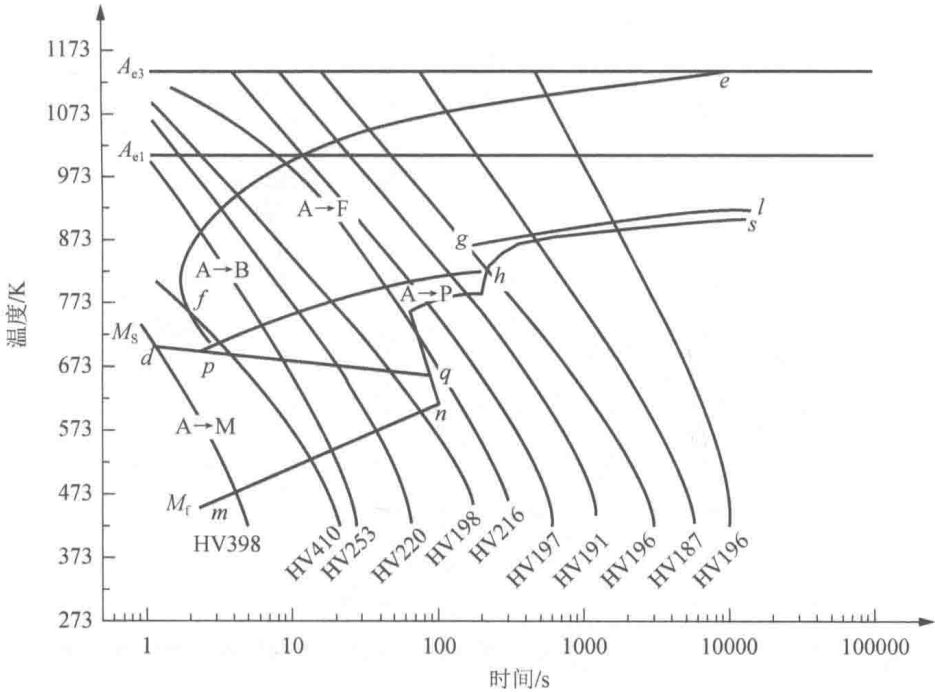


图 2-9 低合金钢 Q345 焊接热影响区的 CCT 曲线

### 2.3.3 相变模型

相变的种类繁多，分类方法不一，按照原子迁移方式可以将其分为扩散型相变和非扩散型相变。铁素体、珠光体和贝氏体的相变属于扩散型相变，马氏体的相变属于非扩散型相变。对于铁素体、珠光体和贝氏体的扩散型相变，常用的扩散型相变模型主要有 JMAK 模型、Leblond 模型和 Kirkaldy 模型；对于马氏体的非扩散型相变，一般采用简单的 Koistinen-Marburger 模型进行数值模拟计算。

#### 1. JMAK 模型

1937~1941 年，Johnson、Mehl<sup>[24]</sup>、Avrami<sup>[25-27]</sup>和 Kolmogorov<sup>[28]</sup>分别提出基于相变动力学的固态相变数学模型，统称为 JMAK 模型。JMAK 模型假设吉布斯自由能为相变驱动力，且与相变速率成比例。

描述相的完全转变时，JMAK 模型的表达式为

$$X_1 = \exp(-kt^n) \quad (2-29)$$

$$X_2 = 1 - \exp(-kt^n) \quad (2-30)$$

式中,  $X_1$ ——母相的体积分数;

$X_2$ ——子相(分解相, 如铁素体、珠光体或贝氏体)的体积分数;

$t$ ——时间;

$k$ ——与新相形核率有关的常数;

$n$ ——与新相形核率及长大速度有关的常数。

描述相的非完全转变时, 生成的子相  $X_2'$  为

$$X_2' = X_2^{\text{eq}} X_2 = X_2^{\text{eq}} [1 - \exp(-kt^n)] \quad (2-31)$$

式中,  $X_2^{\text{eq}}$ ——子相的平衡态组分。

## 2. Leblond 模型

1984 年, Leblond 和 Devaux<sup>[29]</sup>提出了一种新的相变动力学模型(可用于钢铁材料中非等温组织转变的计算), 并以此为基础开发了 SYSWELD 软件, 该软件在焊接、铸造、淬火、热处理和表面处理等过程中得到应用。Leblond 模型可用于求解扩散型相变、非扩散型相变、两相相变及多相相变过程。

两相参与相变的 Leblond 模型如下。

形式 1:

$$\dot{P}_2 = \frac{P_{2\text{eq}}(T) - P_2}{\tau_{1 \rightarrow 2}(T)} \quad (2-32)$$

形式 2:

$$\dot{P}_2 = K(T)P_1 - K'(T)P_2 \quad (2-33)$$

其中

$$K(T) = \frac{P_{2\text{eq}}(T)}{\tau_{1 \rightarrow 2}(T)}; \quad K'(T) = \frac{1 - P_{2\text{eq}}(T)}{\tau_{1 \rightarrow 2}(T)}; \quad P_1 + P_2 = 1$$

式中,  $P_i$ ——第  $i$  相 ( $i=1,2$ ) 的比例;

$\dot{P}_2$ ——第 2 相比比例的增加系数;

$P_{2\text{eq}}(T)$ ——温度  $T$  时刻新相 2 平衡条件下的比例值;

$\tau_{1 \rightarrow 2}(T)$ ——相变在温度  $T$  时的延迟时间。

多相参与相变的 Leblond 模型:

$$\dot{P}_i = -\sum_{i \neq j} [K_{i \rightarrow j}(T) \times F_{i \rightarrow j}(T) \times P_i - K'_{i \rightarrow j}(T) \times F'_{i \rightarrow j}(T) \times P_j] \quad (2-34)$$

式中， $F_{i \rightarrow j}(T)$ 、 $F'_{i \rightarrow j}(T)$ ——与冷却速度相关的函数。该表达式表示  $i$  相转变为其他相时的变化过程。

### 3. Kirkaldy 模型

Kirkaldy 模型是由 Kirkaldy 及其同事<sup>[30-32]</sup>、Watt<sup>[33]</sup>、Henwood<sup>[34]</sup>等开发的，Goldak 和 Akhlagi 将其用于亚共析钢的固态相变。Oddy 等<sup>[35]</sup>进一步开发了该模型。Borgjesson 和 Lindgren 将该模型用于焊接数值模拟。该模型的输入数据为待焊材料的化学成分，用于计算各平衡态温度，通过得到的各平衡态温度校核计算的 TTT 曲线是否正确。通过比较模拟计算的微观组织转变与 CCT 数据校核微观组织模型的准确性。

Kirkaldy 相变动力学方程为

$$\frac{dV}{dt} = B(G, T)V^m(1-V)^p \quad (2-35)$$

式中， $V$ ——转变产物（铁素体、珠光体或贝氏体）的体积分数；

$t$ ——时间；

$B$ ——有效速率系数；

$G$ ——奥氏体晶粒度，采用 ASTM 标准规定；

$T$ ——热力学温度；

$m$ 、 $p$ ——半经验指数，用以保证收敛性。

Oddy 等进一步开发的模型先描述了控制奥氏体分解模型，又描述了瞬时奥氏体形成模型。这些模型可以处理局部奥氏体和多重再加热问题，同时也给出了对相变过程具有显著影响的碳扩散和晶粒长大规律的控制方程。完整的 Kirkaldy 模型流程图如图 2-10 所示。

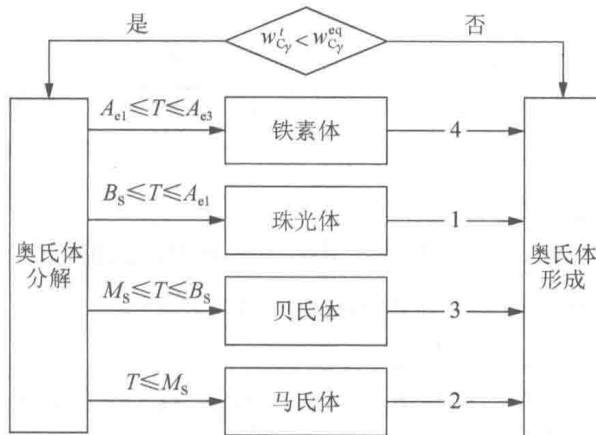


图 2-10 完整的 Kirkaldy 模型流程图

运算有两个主要部分：一个是逻辑性，决定哪个反应先发生；另一个是各相变影响因素经整合的转变方程。转变方程都是刚性方程，最好采用自适应积分算法，对有限元模拟中每个节点或积分点在每个时间步的相含量进行计算。经整合的转变方程的时间步一般很大，在需要的情况下，自适应算法将这些时间步分解为小的增量步。

逻辑算法的第一步是决定奥氏体是发生分解还是形成。如果  $t$  时刻的含碳量  $w_{C\gamma}^t$  小于当前温度下的平衡态含碳量  $w_{C\gamma}^{eq}$ ，那么奥氏体发生分解；反之，奥氏体形成。后者由图 2-8 中的 GS 线得出。

奥氏体分解按图 2-10 左侧顺序进行。铁素体在温度区间  $[A_{e1}, A_{e3}]$  形成，随后珠光体在温度区间  $[B_s, A_{e1}]$  形成。如图 2-10 所示，铁素体含量率先变化。贝氏体转变起始于贝氏体起始温度  $B_s$ ，结束于马氏体转变开始温度  $M_s$ 。根据 Koistinen-Marburger 方程，当达到马氏体起始温度  $M_s$  时，剩余奥氏体将转变为马氏体。

#### 4. Koistinen-Marburger 模型

1959 年，Koistinen 和 Marburger<sup>[36]</sup> 提出用于描述低合金钢和碳钢中奥氏体到马氏体转变的相变动力学模型，并得到广泛采用。经典的 Koistinen-Marburger 模型的标准形式为

$$X_M = 1 - \exp[-\alpha(M_s + M_s^\sigma - T)] \quad (2-36)$$

式中， $X_M$ ——形成的马氏体的体积分数；

$M_s$ ——马氏体相变开始温度；

$M_s^\sigma$ ——应力影响下的马氏体相变开始温度；

$T$ ——当前温度；

$\alpha$ ——反映马氏体转变速率的系数，与材料的化学成分有关。

对于碳钢，可由下式计算：

$$\alpha = \frac{4.61}{91.7w_C + 161} \quad (2-37)$$

若碳钢的含碳量低于 1.1%，则取  $\alpha = 0.011$ 。

若忽略应力应变的影响，则 Koistinen-Marburger 模型的表达式为

$$X_M = 1 - \exp[-\alpha(M_s - T)] \quad (2-38)$$



## 2.4 焊接电弧与焊接熔池

### 2.4.1 焊接电弧

电弧是气体放电的一种形式。焊接电弧是指焊接电极与工件之间发生的强烈而持久的气体放电现象。电弧焊接即利用焊接电弧放电时产生的热量来加热、熔化焊丝（焊条）和母材，使之形成焊接接头。2.1 节对电弧的热输入进行数学建模，得到了电弧的热源模型，然而建模过程中并未基于电弧的产热机理，仅是通过实验现象完成数学建模，其从本质上属于一种唯象的建模方式。本节将从计算机数值模拟的角度探讨电弧的模拟计算方法。

焊接电弧能够连续不断地“燃烧”，是在焊接电场的作用下，中性气体原子不断地被激发、电离及阴极电子发射的结果。因此，从本质上说焊接电弧是一种具有较高温度，同时包含正离子、电子和中性粒子，呈现准电中性的热等离子体（图 2-11）。在焊接力场的作用下，高温等离子体向工件方向运动；周围的气体粒子及保护气氛中的气体粒子又不断补充进入电弧空间，从而形成连续不断的等离子流。

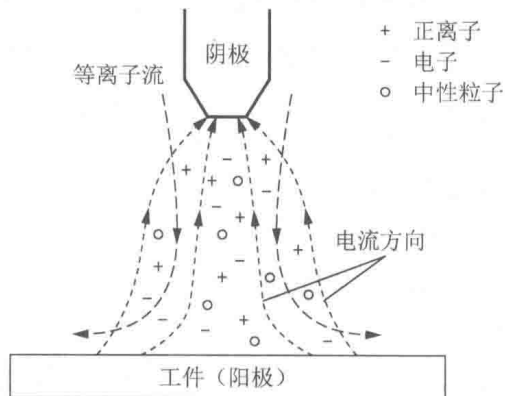


图 2-11 电弧等离子体示意图

电弧等离子体内部的物理作用机制极为复杂，然而在某些假设的前提下，电弧等离子体可在流体力学范畴进行模拟计算，这些假设一般包括：

- 1) 电弧等离子体是处于局部热动力平衡的连续介质，即其流动和传热可用流体力学方程来描述。
- 2) 电弧等离子体是光学薄的，重力、浮力和黏性热耗散忽略不计。
- 3) 电弧等离子体处于不可压缩状态。
- 4) 不考虑电极鞘层的影响。一般认为在电弧焊接过程中电极表面存在着

10~100 μm的鞘层区域,在此鞘层内温度变化剧烈,往往存在着数千到上万摄氏度的温差。此外,这一区域还存在着复杂的粒子电离与带电粒子复合现象,因而无法满足局部热动力平衡假设。

基于上述假设,可将电弧看作一种导电的磁流体,并可在计算流体力学范畴内对其进行研究。计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)是通过计算机进行的、分析计算流体流动和传热等物理现象的一门学科。根据流体力学知识,自然界所有的流动现象都可以用三大守恒方程来描述:①质量守恒方程,也称连续性方程;②动量守恒方程;③能量守恒方程。可以说,计算流体力学即是通过求解上述三大类守恒方程来进行流体力学研究的。

质量守恒是指质量既不能产生,也不会消失,在任何与周围隔绝的物质系统(孤立系统)中,无论发生何种变化或过程,其总质量保持不变。质量守恒在易变形的流体中体现为流动的连续性。因此质量守恒方程又称为连续性方程。

流体的动量守恒用动量定律描述如下:对于给定的流体系统,流体动量随时间的变化率等于作用于其上的外力总和,即 Navier-Stokes 方程。

流体的能量守恒指的是,对某一控制体中流体所做的功和加给该流体的热量之和等于流体的能量增加值。

一般地,在流体力学求解过程中,上述三大守恒方程均可写成标准输运方程的形式:

$$\frac{\partial \rho \phi_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\psi} \phi_k - \Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \right) = S_{\phi_k} \quad (2-39)$$

式中,  $\phi_k$  ——待求解的变量,依求解方程的不同,可能是电势或某方向的速度等变量;

$x_i$  ——某坐标方向;

$t$  ——时间;

$\rho$  ——流体密度;

$\bar{\psi}$  ——通量;

$\Gamma_k$  ——扩散率。

一般将标准输运方程中的  $\frac{\partial \rho \phi_k}{\partial t}$  项称为方程的非稳态项、时间项,它可用来表

征变量随时间的变化;  $\frac{\partial}{\partial x_i} \bar{\psi} \phi_k$  称为方程的对流项;  $\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \right)$  称为方程的扩散

项;而  $S_{\phi_k}$  称为方程的源项。

对于一般流体,通用形式下的质量守恒方程有如下形式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (2-40)$$

式中,  $\vec{v}$ ——流体速度矢量。

质量守恒方程在三维直角坐标系中可展开为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2-41)$$

式中,  $u$ 、 $v$ 、 $w$ —— $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的流体流动速度。

可见, 与标准输运方程相比, 在质量守恒方程中,  $\phi_k = 1$ , 且扩散项与源项均为零。它的物理意义在于, 控制体内流体质量的改变等于各方向上流体流入、流出控制体质量之和。

对于不可压缩流体, 动量守恒方程的一般表达式为

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{F}_b - \nabla \bar{P} + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (2-42)$$

式中,  $\vec{F}_b$ ——流体所受的单位体积力;

$\nabla$ ——哈密顿算子;

$\bar{P}$ ——静压;

$\mu$ ——流体黏度。

式(2-42)即为著名的 Navier-Stokes 方程, 三维直角坐标系下的 Navier-Stokes 方程为

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho F_x \\ \rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho F_y \\ \rho \frac{dw}{dt} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho F_z \end{cases} \quad (2-43)$$

式中,  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ ——作用在流体上的单位体积力在 3 个方向上的分力。

此方程的物理意义为控制体内的流体满足牛顿第二定律, 即控制体动量的变化率等于其所受的外力。可见, 与标准输运方程相比, 动量方程的源项即为各方向上所受的单位体积力。

能量守恒方程形式如下:

$$\rho \frac{d\left(\frac{\vec{v}^2}{2}\right)}{dt} + \rho \frac{dU}{dt} = \rho \vec{F}_b \vec{v} + \operatorname{div}(\bar{P}\vec{v}) + \operatorname{div}(k\nabla T) + S_H \quad (2-44)$$

式中,  $U$ ——内能;

$k$ ——热传导系数;

$T$ ——热力学温度。

可见, 方程左边第一项为流体动能变化率; 左边第二项为内能变化率; 右边四项分别为体积力所做功率、面力所做功率、热传导传入能量及其他能量源项( $S_H$ )。对于不可压缩流体, 如果忽略耗散项, 则能量守恒方程可简写成

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + S_H \quad (2-45)$$

式中,  $c_p$ ——流体比热容。

上述三大类守恒方程均为通用形式下的流体控制方程, 电弧等离子体作为一种特殊的流体, 其首先应遵循上述三大类守恒方程。此外, 电弧等离子体与一般流体相比, 还应具有自身的一些特性, 需根据自身特性对通用控制方程进行一定的处理来求解电弧等离子体方程。

与一般流体相比, 电弧等离子体还具有以下特性:

1) 在作用力上, 电弧等离子体在运动过程中会产生电磁力, 对等离子体的运动产生影响。

2) 在能量方面, 电弧等离子体在流动的同时还参与导电, 且电流密度较高, 会产生较强的欧姆热效应、较强的辐射效应及流入电极带电粒子所带有的能量等, 这些均会对电弧的能量产生影响。

由此可见, 除质量守恒方程外, 还需要对动量守恒方程和能量守恒方程的源项进行处理, 以体现电弧等离子体的磁流体特性, 从而建立电弧等离子体控制方程。

电弧等离子体由自由带电粒子构成, 带电粒子在电磁场中的运动会受到电磁力  $F$  的影响, 但由于电弧等离子体具有的准电中性, 电场力对其影响要比磁场力小得多。因此, 可认为此处电磁力约等于洛伦兹力, 有如下形式:

$$\vec{F} = \rho_e \vec{E} + \vec{J} \times \vec{B} \approx \vec{J} \times \vec{B} \quad (2-46)$$

式中,  $\rho_e$ ——自由电荷质量;

$\vec{E}$ ——电场强度;

$\vec{J}$ ——电流密度;

$\vec{B}$ ——磁感应强度。

且有

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2-47)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2-48)$$

式中,  $\sigma$ ——流体电导率;

$\mu_0$ ——真空磁导率;

$\vec{H}$  —— 磁场强度。

为求解  $\vec{B}$ ，引入磁矢势  $\vec{A}$ ：

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2-49)$$

且在均匀磁介质下满足：

$$\nabla \vec{A} = -\mu_0 \vec{J} \quad (2-50)$$

对于电弧能量方程的源项  $S_H$  [式 (2-44)]，在忽略等离子体重力、浮力所做功及黏性耗散条件下，一般还应包括欧姆热  $P_O$ 、辐射能量  $P_R$  及带电粒子所携带的能量  $P_E$ ，可表示为

$$S_H = P_O + P_R + P_E \quad (2-51)$$

其中，依欧姆定律有

$$P_O = \frac{\vec{J}^2}{\sigma} \quad (2-52)$$

对于高温等离子体的辐射能，可使用简化的净辐射模型：

$$P_R = 4\pi\epsilon_N \quad (2-53)$$

式中， $\epsilon_N$  —— 高温气体净发射系数。

焊接时，电子会由阴极区进入弧柱等离子区，而将电子所携带的这部分能量表示为

$$P_E = \frac{5}{2} \frac{k_B}{e} \vec{J} T_e \quad (2-54)$$

式中， $k_B$  —— Boltzmann 常数 ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )；

$e$  —— 电子电量 ( $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ )；

$T_e$  —— 电子温度。

## 2.4.2 焊接熔池

熔焊时，工件上所形成的具有一定几何形状的液态金属部分称为焊接熔池。焊接熔池内的液态金属并非静止不动，而是在多种力的作用下剧烈流动，且伴随着传热、对流与相变等复杂物理过程。显然，焊接液态熔池属于流体力学研究范畴，它的流动行为同样受质量守恒、动量守恒及能量守恒三大方程制约。

作用于焊接熔池液态金属的力主要包括重力、浮力、电磁力、表面张力、电弧力等，如图 2-12 所示。其中，电弧力（尤其是在焊接电流小于 200A 时）与其他几个力比起来较小，常可忽略。

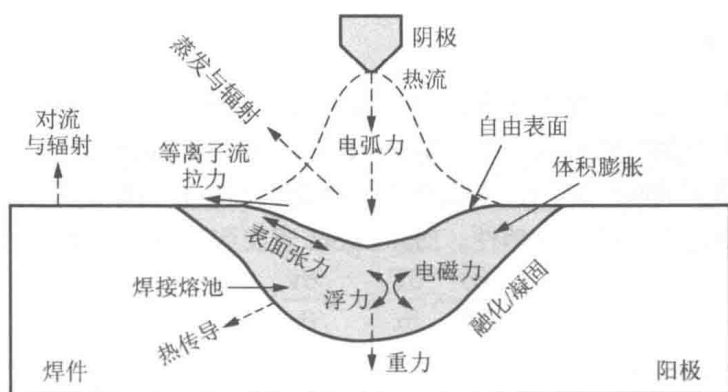


图 2-12 TIG 焊熔池示意图

### 1. 浮力

在焊接过程中，热量往往是从熔池上表面进入工件的，这就造成了熔池内液态金属的温度不均衡，使熔池内液态金属的密度随空间和时间的改变而形成密度梯度。由于密度梯度的存在，液态金属在重力的作用下不能维持先前的静力平衡效应，由此形成了液态金属的流动行为（在温度梯度驱使下），流动的目的是使液态金属的温度趋于相同。在计算过程中，由温度梯度而引起的浮力有两种处理方法：一是把液态金属的密度视为温度的函数；二是采用 Boussinesq 假设（不考虑温度改变所造成的密度变化，而将流场中因温度差形成的浮力以源项的方式加入动量方程的源项中）。Boussinesq 浮力假设的表达式为

$$G = -\rho_1 g \beta (T - T_0) \quad (2-55)$$

式中， $\rho_1$ ——参考温度  $T_0$  下液态金属的密度；

$g$ ——重力加速度；

$\beta$ ——液态金属的体积膨胀系数；

$T_0$ ——参考温度，这里取液态金属熔点；

$T$ ——流体温度。

### 2. 电磁力

在焊接过程中，电弧区域和熔池区域内存在着自感应磁场，磁场与电流相互作用产生的电磁力（洛伦兹力）作用在焊接熔池中各个质点上。由于电流是分散的，因此其在工件中是不均匀分布的。这就造成工件中电磁力大小分布不均匀，所以液态金属中每个质点所受电磁力大小也各自不同，从而驱使焊接熔池内液态金属流动。在焊接熔池计算模型中，电磁力（洛伦兹力）的计算公式与式（2-46）相同。

### 3. 表面张力

表面张力的大小由熔池表面的温度梯度决定。表面张力和表面张力梯度共同促使液态金属发生对流行为，称为 Marangoni 对流。Marangoni 对流驱使液态金属向表面张力增大的趋势流动。表面张力梯度的大小和方向取决于熔池表面的温度梯度和表面张力对温度的依赖性。Marangoni 表面张力可表述为

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \gamma}{\partial T} \times \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \mu \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial \gamma}{\partial T} \times \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2-56)$$

式中， $T$ ——流体温度；

$x$ 、 $y$ ——熔池自由表面所在平面坐标；

$z$ ——工件厚度方向坐标；

$u$ 、 $v$ —— $x$  方向速度分量与  $y$  方向速度分量；

$\mu$ ——液态金属的动力黏度系数；

$\gamma$ ——表面张力；

$\frac{\partial \gamma}{\partial T}$ ——表面张力温度系数。

## 第 3 章

# 有限元软件基础

工欲善其事，必先利其器。对焊接过程进行数值模拟，在宏观尺度上可分为固体力学范畴与流体力学范畴。本书选用通用有限元软件作为焊接数值模拟的主要工具。本章介绍应用 Abaqus 与 Fluent 软件进行焊接数值模拟的必备基础知识、基本名词术语与软件操作方法，以及一般模拟问题的基本思路与对策。

### 3.1 Abaqus 软件基础

#### 3.1.1 Abaqus 软件简介

Abaqus 软件的命名来源于中国古老的计算工具——算盘 (abacus)。它是一整套通用大型有限元软件包，是国际公认的较先进的大型通用非线性有限元软件之一。

Abaqus 软件的主要创始人 Hibbitt 于 1972 年毕业于布朗大学工程学院，其博士学位论文 *A numerical thermo-mechanical model for the welding and subsequent loading of a fabricated structure* 涉及焊接过程的非线性有限元计算。在当时并没有哪一个有限元计算软件可以完成如此复杂的非线性计算。毕业后，Hibbitt 与其导师 Marcal 合作开发了非线性有限元软件 Marc。1978 年，Hibbitt 与 Karlsson、Sorenson 合作创立了 HKS 公司，并推出 Abaqus 软件包。

Abaqus 软件具有先天的非线性计算能力。2005 年达索系统公司收购 ABAQUS 公司，将其命名为 SIMULIA 公司，并继续丰富其计算能力。当前的 Abaqus 软件融结构、热、流体、电磁、声学于一体，广泛应用于机械制造、石油化工、航空航天、汽车交通、土木工程、国防军工、水利工程、生物医学、电子工程、能源、地矿、造船及日常家电等工业和科学领域。

Abaqus 软件包主要包含三个核心模块：Abaqus/Standard（隐式求解器）、



Abaqus/Explicit (显式求解器) 和 Abaqus/CAE (完整的 Abaqus 操作环境)。从 6.10 版本开始又增加了 Abaqus/CFD (计算流体力学) 模块, 加强了流固耦合计算功能。

### (1) Abaqus/Standard

Abaqus/Standard 是一个通用分析模块, 它能够求解广泛领域的线性和非线性问题, 包括静态分析、动态热分析、复杂的接触及非线性耦合物理场分析等。

### (2) Abaqus/Explicit

Abaqus/Explicit 运用显式积分求解动态有限元方程。该模块适用于分析冲击或爆炸这样短暂、瞬时的动态问题或半静态问题, 对高度非线性问题也非常有效。

### (3) Abaqus/CAE

Abaqus/CAE 是 Abaqus 有限元分析的前后处理模块, 也是 Abaqus 交互式、可视化的图文环境, 它可以方便快捷地构造模型, 为部件定义材料特性、载荷、边界条件等模型参数。Abaqus/CAE 具有强大的网格划分能力, 并可检验所构造的分析模型, 提交、监视和控制分析作业, 然后使用后处理模块来显示和分析计算结果。

Abaqus 除了上面三个基本模块之外, 还有一系列的专用分析模块, 本书不作讨论。

## 3.1.2 Abaqus 帮助文档

Abaqus 具有一套极其详尽的用户手册。常用的手册有 *Getting Started with Abaqus* (《Abaqus 入门指南》)、*Abaqus Analysis User's Manual* (《Abaqus 分析用户手册》)、*Abaqus/CAE User's Manual* (《Abaqus/CAE 用户手册》)、*Abaqus Keywords Reference Manual* (《Abaqus 关键词参考手册》)、*Abaqus Example Problems Manual* (《Abaqus 实例手册》)、*Abaqus Benchmarks Manual* (《Abaqus 标准校核手册》) 和 *Abaqus Verification Manual* (《Abaqus 验证手册》) 等。可以通过选择菜单栏中的 Help 菜单访问 Abaqus 用户手册, 也可以通过在 Windows 操作系统中选择“开始”→“所有程序”→Abaqus 6.xx Documentation→HTML Documentation 命令访问 Abaqus 用户手册。Abaqus 6.11 帮助文档如图 3-1 所示。

初学者应从 *Getting Started with Abaqus* 入手, 了解 Abaqus 有限元分析的基本概念, 掌握其中的分析实例。随着学习的深入学习者可以熟悉 *Abaqus Analysis User's Manual*, 在操作中遇到不熟悉的功能可以查阅 *Abaqus/CAE User's Manual* 和 *Abaqus Keywords Reference Manual*, 如果想进行功能的扩展与二次开发可参阅 *Abaqus User Subroutines Reference Manual* 和 *Abaqus Scripting User's Manual*。帮助文档中还提供了大量的实例可供参考, 可在 *Abaqus Example Problems Manual*、

*Abaqus Benchmarks Manual* 和 *Abaqus Verification Manual* 中寻找相应算例<sup>[37]</sup>。

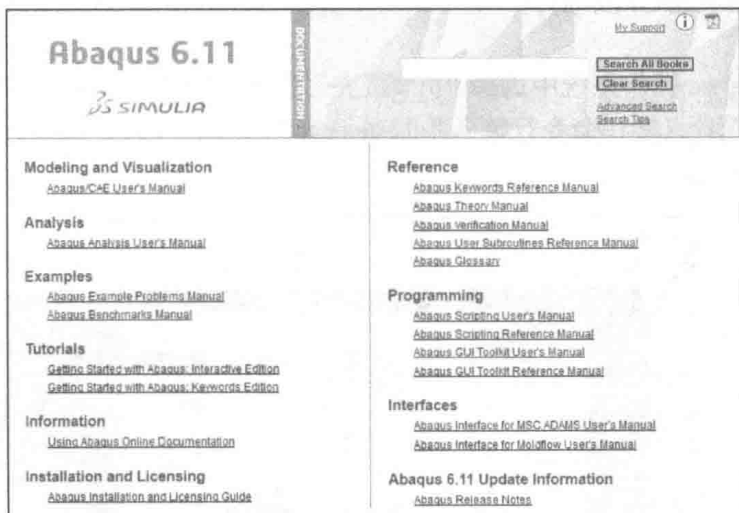


图 3-1 Abaqus 6.11 帮助文档

## 3.2 Abaqus 的初步使用

### 3.2.1 Abaqus 分析的基本步骤

应用 Abaqus 进行有限元分析一般包括以下 3 个步骤：前处理、模拟计算和后处理。

#### (1) 前处理

利用 Abaqus/CAE 或其他前处理软件建立分析对象的有限元模型、赋予材料属性、施加载荷与边界条件、完成网格划分，最终生成一个可用于 Abaqus 模拟计算的输入文件（jobname.inp）。

#### (2) 模拟计算

在模拟计算阶段，利用主求解器（Abaqus/Standard、Abaqus/Explicit 或 Abaqus/CFD）对输入文件中所定义的数值模型进行数值计算，通常以后台方式进行。分析结果保存在结果文件中，以便于后处理。

#### (3) 后处理

Abaqus/CAE 后处理模块 Abaqus/Viewer 可以用来读入分析结果数据，以多种方法显示分析结果，包括彩色云图、动画、变形图，并可绘制结果变量曲线图等。

### 3.2.2 Abaqus/CAE 简介

在 Windows 操作系统中选择“开始”→“所有程序”→Abaqus 6.xx→Abaqus CAE 命令，或者直接在命令行输入“abaqus cae”即可进入 Abaqus/CAE 启动界面，如图 3-2 所示。

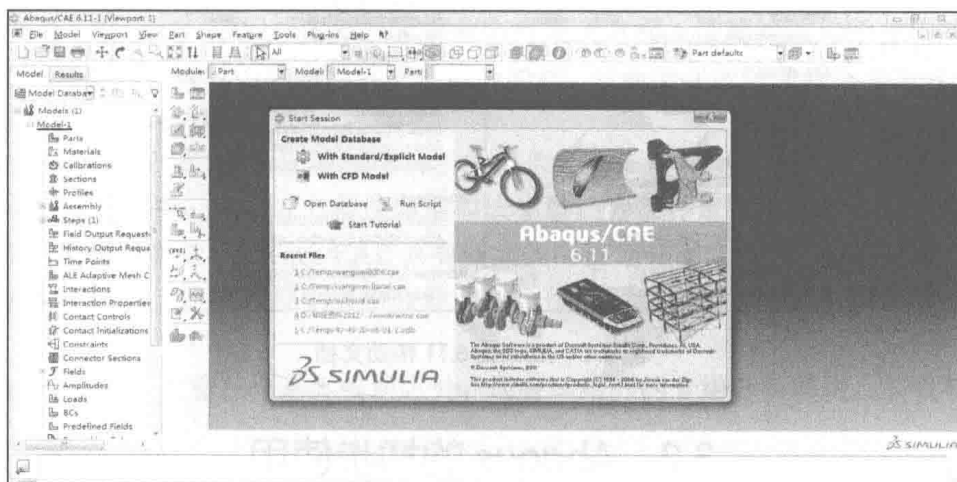


图 3-2 Abaqus/CAE 启动界面

Abaqus/CAE 的主窗口由标题栏、环境栏、工具栏、菜单栏、模型树、工具箱、视图区、提示区、信息区及命令行接口组成，如图 3-3 所示。

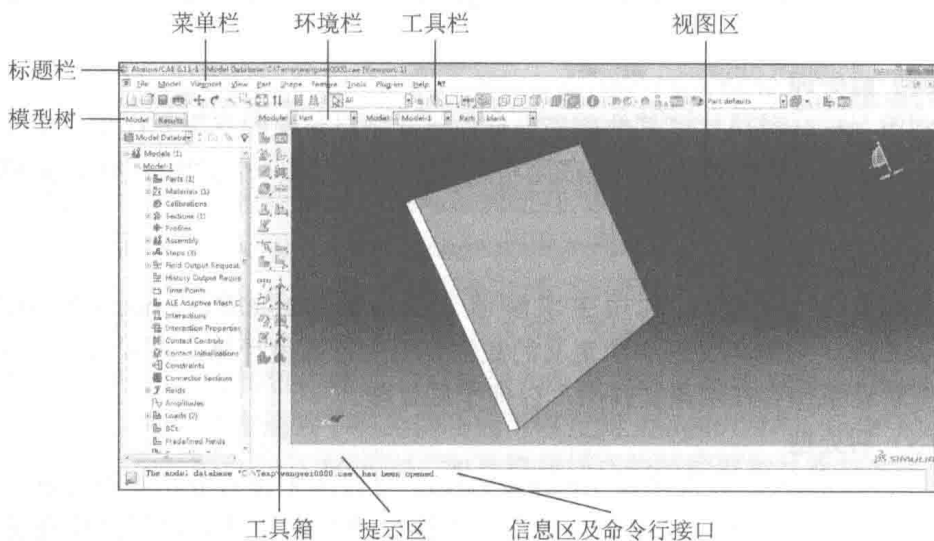


图 3-3 Abaqus/CAE 的主窗口

### 3.2.3 Abaqus/CAE 的功能模块

Abaqus/CAE 的功能模块涵盖了完成一个一般数值模拟分析所要经历的前处理和后处理的所有步骤。它由以下功能模块组成：**Part**（部件）、**Property**（材料性能）、**Assembly**（装配）、**Step**（分析步）、**Interaction**（相互作用）、**Load**（载荷）、**Mesh**（网格）、**Optimization**（优化）、**Job**（作业）、**Visualization**（可视化）、**Sketch**（绘图），如图 3-4 所示。每个模块定义了模拟过程的一个逻辑方面。

下面对常用功能模块的基本功能进行简要描述。

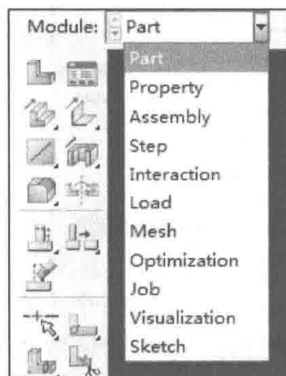



图 3-4 Abaqus/CAE 的功能模块

#### 1. Part 模块

Part 模块的基本功能是创建、编辑和管理部件，其工具箱如图 3-5 所示。可以在 Abaqus/CAE 中直接创建部件，也可以导入其他程序包生成的几何体。在菜单栏中选择 **Part**→**Create** 命令，或者在工具箱中直接单击  按钮，打开图 3-6 所示 **Create Part**（创建部件）对话框。

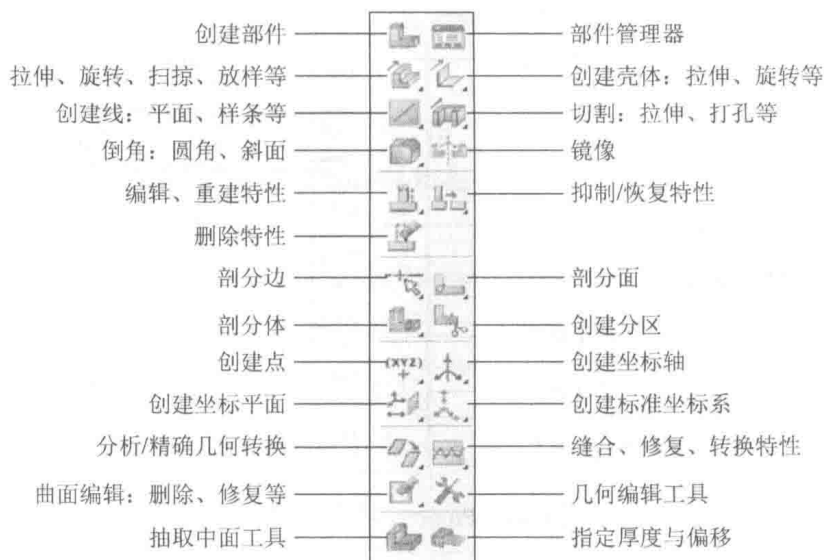


图 3-5 Part 模块工具箱

**Modeling Space**（模型空间类型）有 **3D**（三维）、**2D Planar**（二维平面）和 **Axisymmetric**（轴对称）3 种。**Shape**（部件形状类型）有 **Solid**（实体）、**Shell**（壳

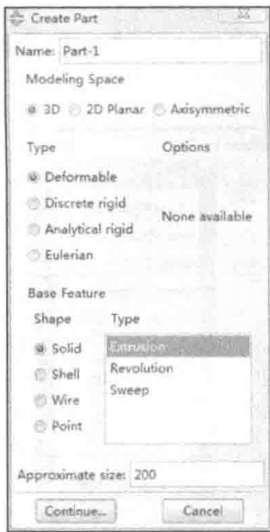


图 3-6 Create Part 对话框

体)、Wire (线) 和 Point (点) 4 种类型。通过画平面草图的方式生成部件, 依 Type (生成方式) 的不同, 分 Extrusion (挤压)、Revolution (旋转) 和 Sweep (扫掠) 3 种方式。

## 2. Property 模块

Property 模块的功能是创建和管理材料、截面属性、梁截面, 指定部件的截面属性、取向、法线方向和切线方向, 其工具箱如图 3-7 所示。材料属性包括: 一般特性, 如密度; 机械性能, 如弹、塑性和热性能 (如热导率、比热容等)。截面属性有实体和壳体等。

在一般的三维分析中, 在 Property 模块中至少要完成 3 个方面的设定, 即定义材料属性、创建区域截面属性及将定义的材料属性赋予此区域。必须保证所有部件的所有区域都被赋予相应的材料属性。在 Module (模块) 下拉列表中选择 Property 选项, 在菜单栏中选择 Material→Create 命令创建材料属性; 选择 Section→Create (创建截面) 命令创建截面属性; 选择 Assign→Section (分配截面) 命令可以赋予区域材料属性。

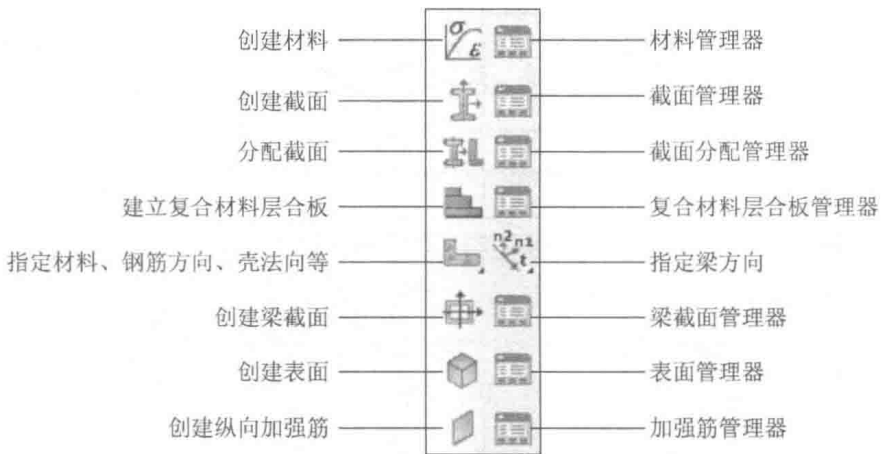


图 3-7 Property 模块工具箱

## 3. Assembly 模块

Assembly 模块的功能是创建、合并和切割实体, 为初始各部件进行定位, 其工具箱如图 3-8 所示。模型中的装配件由至少一个实例 (instance) 组成。

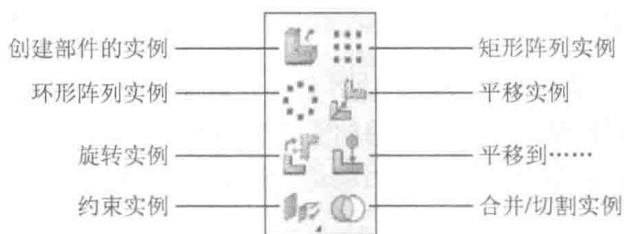


图 3-8 Assembly 模块工具箱

#### 4. Step 模块

Step 模块的功能是创建分析步、设定输出数据、设定自适应网格、控制求解过程等，其工具箱如图 3-9 所示。Abaqus/CAE 会自动创建一个初始分析步（initial step），用户还需自行创建后续分析步（analysis step）、设定分析步时长与增量步参数、设定结果变量的输出等。分析步的类型有静态、动态和热分析等。分析步类型的设定直接决定着结果变量的输出类型，以及后续模拟中的其他设定。

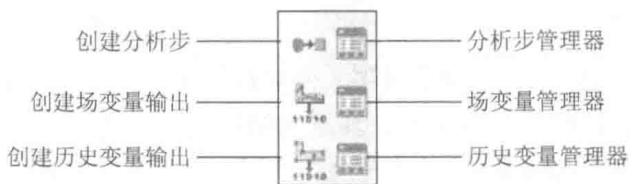


图 3-9 Step 模块工具箱

#### 5. Interaction 模块

Interaction 模块的功能是定义相互作用、约束、连接件、惯量、裂纹、弹簧和阻尼器等，其工具箱如图 3-10 所示。焊接相关模拟中部件间及部件与外界之间的热交换也属于一种相互作用。

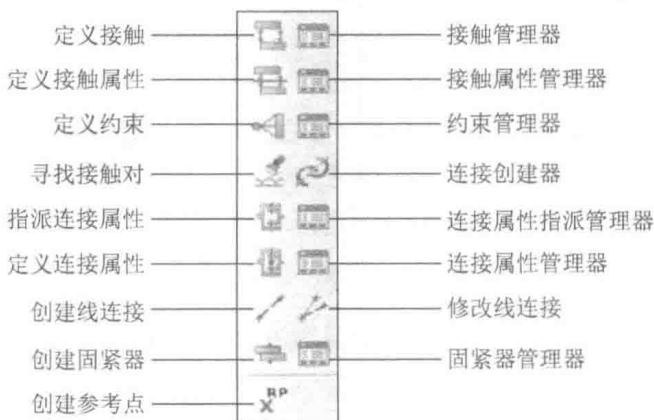


图 3-10 Interaction 模块工具箱

## 6. Load 模块

Load 模块的功能是定义载荷、边界条件、场变量和载荷初始状况等，并将指定的分析步施加到模型上，其工具箱如图 3-11 所示。载荷不仅包括力的载荷，也包含热的载荷，如焊接电弧的热作用就是一种热流载荷。

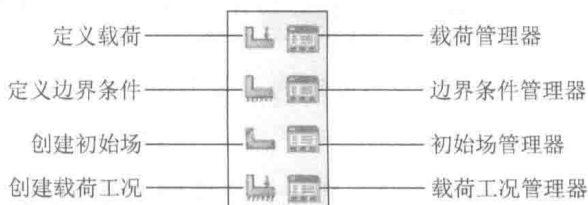


图 3-11 Load 模块工具箱

边界条件一般是针对自由度而言的。一个三维力学分析有 6 个自由度，即 3 个轴的平动与绕 3 个轴的转动。

## 7. Mesh 模块

Mesh 模块的功能是布置网格种子，设置单元形状、单元类型、网格划分技术和算法，划分网格，检验网格质量，其工具箱如图 3-12 所示。对于二维问题，可供选择的单元类型有 Quad（四边形单元）和 Tri（三角形单元）；对于三维问题，可供选择的单元类型有 Hex（六面体单元）、Tet（四面体单元）和 Wedge（楔形单元）。划分技术有 Structured（结构化）、Sweep（扫掠）和 Free（自由）等。结构化网格和扫掠网格一般采用 Quad 类型和 Hex 类型，分析精度相对较高。

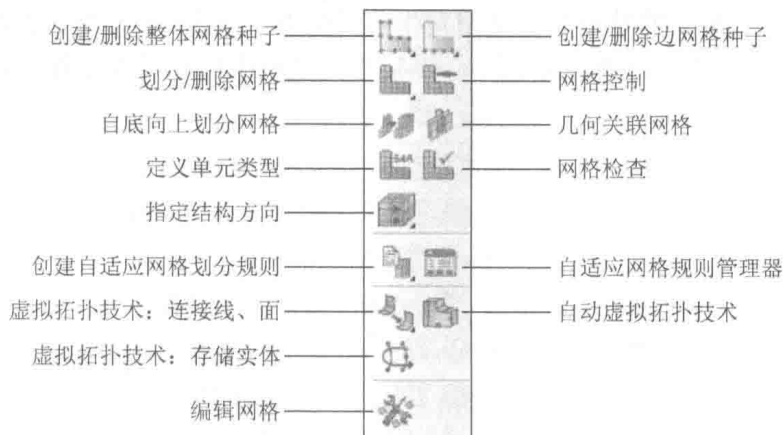


图 3-12 Mesh 模块工具箱

## 8. Job 模块

Job 模块的功能是创建分析作业并命名、设定并行计算 CPU 数、设定最大内

资源使用量、提交和运行分析作业、生成输入 (.inp) 文件、监控分析作业的运行状态、中止分析作业的运行等，其工具箱如图 3-13 所示。

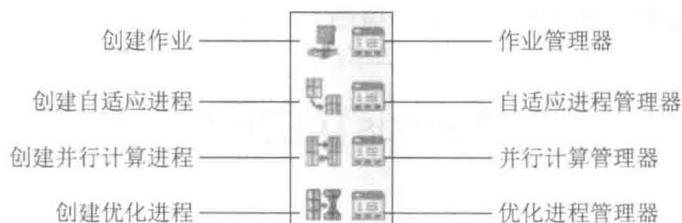


图 3-13 Job 模块工具箱

### 9. Visualization 模块

Visualization 模块的功能是显示.odb 文件中的分析结果，包括变形图、云图、动画及绘制结果数据曲线等，其工具箱如图 3-14 所示。



图 3-14 Visualization 模块工具箱



## 10. Sketch 模块

Sketch 模块的功能为绘制二维平面图。

## 3.3 Abaqus 中的单位体制

在 Abaqus 中除了“转动自由度采用弧度单位,其他角度的度量采用角度单位”这一强制约定外,并无内置的单位体制。换句话说,采用什么单位体制由用户自己决定,但用户必须保证在同一分析作业中采用的所有物理量单位具有自洽性。

单位的自洽性是指所采用的单位必须能够直接由基础物理量单位导出,而不用乘以任何转换系数。例如,国际单位制(简称 SI)就是一套自洽的单位体制,其基础物理量和单位包括长度(m)、质量(kg)、时间(s)、温度(K)及电流(A)等 7 个。其他所有的物理量单位均可由以上基础单位导出。例如,力的国际单位牛顿(N)可由基本单位导出,即  $1\text{N}=1\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ ; 能量的国际单位焦耳(J)可由基本单位导出,即  $1\text{J}=1\text{N}\cdot\text{m}=1\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$  等。

在计算过程中,完全采用国际单位制的好处是简洁而不容易出错。这是因为文献或工具书中给出的材料属性参数往往采用国际单位制,可以不用进行单位变换直接使用。但使用国际单位制的不足之处在于,对于有限元常规计算尺度而言,长度的单位 m 过大,而应力的单位 Pa 又过小。因此在实际焊接数值模拟过程中常使用毫米-吨-秒(mm-t-s)单位及其导出单位,即以国际单位制的 7 个基本单位为基础,选取毫米(mm)作为长度单位,吨(t)作为质量单位,保留其余基本物理量的国际单位。常用物理量单位换算关系表见附录。

## 3.4 Abaqus 中的单元

有限元,即有限个单元。有限元分析时,首先将物体划分成有限个单元,不同的单元适用于不同的分析类型,甚至直接影响分析的结果。下面简要介绍 Abaqus 中的单元。

### 3.4.1 单元的分类

Abaqus 单元库中提供了丰富的单元类型,以适应不同的结构、几何形状及不同的分析计算类型。Abaqus 的基本构件单元大致可分为两大类:有限单元和刚体

单元, 其中刚体单元在计算中不发生变形, 但可以发生刚体位移, 适合于模拟刚性结构。有限单元又可以分为连续单元 (continuum element)、结构单元 (structural element) 和连接单元 (connection element) 等。连续单元又称实体单元 (solid element), 是计算中最常用的单元; 结构单元一般具有特定的结构特征, 如壳单元 (shell element)、梁单元 (beam element)、杆单元 (truss element) 和薄膜单元 (film element) 等; 而连接单元用于定义计算中两部分的连接。

### 3.4.2 单元的特征与命名

每个单元都可用单元族 (family)、节点数目 (number of nodes)、自由度 (degrees of freedom)、数学描述 (formulation) 和积分 (integration) 来表征其特性与命名。

#### (1) 单元族

根据几何形状的不同, 单元族可分为连续单元、壳单元、梁单元、杆单元和刚性单元等。在 Abaqus 中, 单元的单元族常用此单元的首字母表示。例如, S4 代表壳单元, C3D8R 代表连续单元, B21 代表梁单元等。

#### (2) 节点数目

按节点位移插值阶数, Abaqus 可分为一阶单元 (或线性单元) 和二阶单元 (或二次单元)。

#### (3) 自由度

焊接模拟过程中常用的自由度有平移 (displacement)、转动 (rotation)、温度 (temperature) 和电势 (electric potential)。Abaqus 软件采用约定方式对自由度进行编号, 即 1 为  $x$  轴平动, 2 为  $y$  轴平动, 3 为  $z$  轴平动, 4 为绕  $x$  轴转动, 5 为绕  $y$  轴转动, 6 为绕  $z$  轴转动, 9 为电势, 11 为温度。

#### (4) 数学描述

数学描述即定义单元行为的数学理论。常见的数学描述有平面应变 (plane strain)、平面应力 (plane stress)、杂交单元 (hybird element)、非协调模式单元 (incompatible mode element) 等。

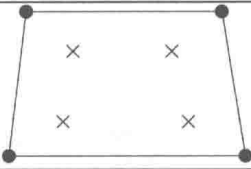
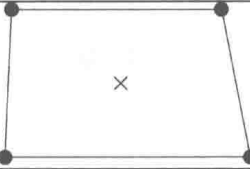
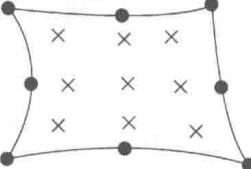
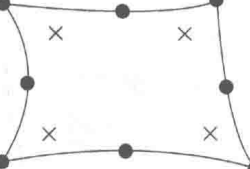
#### (5) 积分

单元的刚度和质量在单元内的采样点进行模拟计算, 这些采样点即积分点。数值积分的算法影响单元的行为。Abaqus 包括完全积分 (full integration) 和减缩积分 (reduced integration)。

完全积分是指当单元具有规则形状时, 所用的高斯积分点的数目足以对单元刚度矩阵中的多项式进行精确积分。减缩积分是指在完全积分单元的每个方向上

少用一个积分点。表 3-1 所示为线性（一阶）完全积分单元、二阶完全积分单元、线性（一阶）减缩积分单元及二阶减缩积分单元的对比。

表 3-1 线性（一阶）完全积分单元、二阶完全积分单元、线性（一阶）减缩积分单元及二阶减缩积分单元的对比

单元种类	完全积分	减缩积分
线性（一阶）单元		
二阶单元		

### 3.4.3 单元的选择

#### (1) 单元族的选择

应根据所要计算的种类选取合适的单元族。例如，是进行热分析还是热力耦合分析，是进行静力分析还是质量扩散分析等，不同的分析类型应选择不同的单元族。

#### (2) 连续单元与结构单元

对于可以等效成结构单元的模型，采用结构单元可以大幅减少单元数量，进而加快分析进程。那么究竟什么样的结构特点可以采用结构单元建模呢？一般认为，如果满足壳体厚度或者梁横截面尺寸小于其典型整体结构尺寸的 1/10，可以适当选用结构单元进行建模。

#### (3) 一/二阶单元与完全/减缩积分单元的比较

从计算成本上考虑，由于计算点数量的减少，一阶单元较二阶单元、减缩积分单元较完全积分单元具有一定的优势。但需要注意的是，当承受弯曲载荷时，线性（一阶）完全积分单元会出现剪切自锁现象，造成单元过于刚硬，即使划分很细的网格，计算精度仍然很差。而线性（一阶）减缩积分单元对位移求解结果比较精确，在弯曲载荷下不会发生剪切自锁现象，网格的扭曲变形对分析精度影响不大。

二阶单元在处理应力集中问题时效果要明显好于一阶单元，而二阶减缩积

分单元既延续了线性（一阶）减缩积分单元计算效率高的优点，又可以有效避免沙漏问题，即使在复杂应力状态下，对自锁问题也不敏感，但不适用于接触分析和大应变问题。

## 3.5 Abaqus 的主要文件类型

在 Abaqus 的使用过程中，会产生许多不同类型的文件，有些是在 Abaqus 运行时产生的，运行后自动删除；其他一些用于分析、重启、后处理、结果转换或其他软件的文件则被保留。以文件扩展名为例详述如下。

1) .cae 文件：图形化的模型文件，包含前处理所做的所有设定，在 Abaqus/CAE 中建立并保存。

2) .jnl 文件：日志文件，包含用于复制已存储模型数据库的 Abaqus/CAE 命令，\*.cae 和 \*.jnl 构成支持 CAE 的两个重要文件，要保证在 Abaqus/CAE 中打开一个项目，这两个文件必须同时存在。

3) .inp 文件：输入文件，即用于提交计算的文本化的模型文件，包含前处理所做的所有设定，也可导入 Abaqus/CAE 中打开，但有些.inp 文件命令不被 Abaqus/CAE 所兼容。

4) .dat 文件：结果数据文件，记录计算之前的数据、参数检查等信息，同时也可输出部分计算结果数据。

5) .sta 文件：状态文件，记录分析过程中的信息。

6) .msg 文件：计算过程的详细记录，分析计算中的平衡迭代次数、计算时间、警告信息等可由此文件获得。

7) .res 文件：重启动文件，用于重启动计算，只有被要求时才会输出。

8) .odb 文件：输出数据库文件，即结果文件，需要由 Visualization（可视化）模块打开。

9) .fil 文件：结果文件，可被其他应用程序读入的分析结果表示，只有被要求时才会输出。

10) .rpy 文件：用 Python 语言记录每一次操作中的大部分 Abaqus/CAE 命令的文件。

11) .lck 文件：锁定文件，在程序打开或写入输出数值库时产生，阻止其他进程并发写入，关闭输出数据库或计算终止时自行删除。

12) .rec 文件：包含用于恢复内存中模型数据库的 Abaqus/CAE 命令。

13) .for 文件：用 FORTRAN 语言编写的子程序文件。

## 3.6 .inp 文件

.inp 文件即 Abaqus 的输入文件，是一种以 .inp 为扩展名的文本文件，可以用文本编辑器打开，方便地进行修改。它记录了前处理过程中对模型所做的全部设定，是联系前处理器与求解器的桥梁，用于提交计算。

### 3.6.1 .inp 文件的组成

一个 .inp 文件由模型数据和历史数据两部分组成。

模型数据的作用是定义一个有限元模型，包括节点、单元、单元性质、定义材料等有关说明模型自身的数据。

历史数据的定义是模型运动的进程。模型响应的载荷历史被分成一系列的时步 (step)。每一时步就是一个响应 (静态加载、动态响应等)，时步的定义包括过程类型 (如静态应力分析、瞬时传热分析等) 对于时间积分的控制参数或者非线性解过程 (加载和输出要求)。

### 3.6.2 .inp 文件的结构

1) .inp 文件以 \*HEADING 开头。

2) 模型数据部分定义节点、单元、材料、初始条件等。模型数据的层次为部件、组装、模型。必需的模型数据有以下两种。

① 几何数据：模型的几何形状是用单元和节点来定义的，结构性单元的截面是必须定义的，如梁单元。特殊的特征也可以用特殊的单元来定义，如弹簧单元、阻尼器、点式群体等。

② 材料的定义：即定义使用的哪种材料。

3) 历史数据部分：用来定义分析的类型、载荷、输出要求等，即对模型施加了什么或发生了什么。它由一系列的分析步组成，目的就是预测模型对某些外部载荷或者某些初始条件的反映。每个分析步用 \*STEP 开始，用 \*END STEP 结束。\*STEP 是历史数据和模型数据的分界点，第一次出现的 \*STEP 之前是模型数据，之后是历史数据。

### 3.6.3 .inp 文件的语法格式

Abaqus 的 .inp 文件是以“行”的形式体现的，行的类型有关键字行、数据行

与注释行 3 种。

### (1) 关键字行

关键字行引入相应的命令，常带有参数，一般参数以用逗号隔开的词或短语的形式出现。格式如下：

```
*Keyword, parameter1, parameter2,...
```

1) 第一个非空格的字符必须以\*开始，后面接的是关键字，然后定义参数的内容。

2) 若有参数，则参数和关键字之间必须用“,”隔开。

3) 参数之间必须用“,”隔开。

4) 关键字行中的空格可以忽略。

5) 每行的长度不能超过 256 个字符。

6) 关键字和参数不区分大小写（在类 Linux 操作系统中，文件名作为参数时，是区分大小写的）。

7) 假如参数有响应值，则赋值号是“=”。

8) 在一个关键字行中，同一个参数仅能出现一次。

9) 关键字行可以延续，如参数的名称很长，要在下一行继续这个关键字行，则可以用“,”来连接。

10) 有些关键字行允许 INPUT 和 FILE 作为参数输入文件名，这样的文件名必须包括一个完整的路径名或一个相对路径名。

### (2) 数据行

数据行由一系列的数字或字母代号组成，数据行必须紧接着关键字行。关键字行可以看作要执行的命令或设定，而数据行可以看作命令或设定所涉及的对象或具体内容。

1) 若数据行和关键字相联系，则必须紧跟关键字行。

2) 一个数据行包括空格在内不能超过 256 个字符。

3) 所有的数据条目之间必须用“,”隔开。

4) 一个数据行所能包含的数据的个数由该关键字决定。

5) 字符串最多可包含 80 个字符，且不区分大小写。

6) 数据行可以重复，也就是说每行数据可以有一行或几行响应的变量，同样可以有多行数据行对应各自的变量行。

### (3) 注释行

注释行可以出现在.inp 文件的任意位置，但必须以\*\*开始，仅起提示作用，不参与运算。

### 3.6.4 .inp 文件的修改

在菜单栏中选择 Model (模型) → Edit Keywords (编辑关键字) 命令可以修改模型所对应的.inp 文件, 但功能有限, 只能修改关键字行和部分数据行。在 Job 模块中提交修改后的.inp 文件或生成新的.inp 文件时, 在 Edit Keywords 对话框中所做的修改会起作用, 当保存模型数据库时这些修改也会被一起保存。

.inp 文件作为一种文本文件, 可用任意一种文本编辑器打开并修改。但如果模型较大, 对应的.inp 文件会显得臃肿繁杂。建议采用具有代码折叠功能的一类编辑器, 如 Vim (或 Gvim), 可以方便地对.inp 文件进行编辑操作。需注意的是, 修改完成的.inp 文件不会立即影响模型数据库 (.cae 文件), 如果想在图形模式下看到所做的修改, 需要重新将它导入 Abaqus/CAE 中, 具体操作为在菜单栏中选择 File (文件) → Import (导入) → Model 命令, 然后选择对应的.inp 文件。

### 3.6.5 .inp 文件的执行

一般通过命令行的方式执行.inp 文件。启动 Abaqus 命令行的方法为, 在 Windows 操作系统中选择“开始”→“所有程序”→Abaqus 6.xx→Abaqus Command (命令行) 命令。

.inp 文件的执行包括两大主要功能: 进行数据检查和提交分析运行。

1) 进行数据检查: 仅做分析前的数据检查, 为进行分析做准备。数据检查可检查出.inp 文件中的语法错误, 并将有关信息存储在 job-name.dat 文件中。

应用命令行方式进行.inp 文件数据检查的方法为, 在 Abaqus 命令行窗口输入命令:

```
abaqus job= job-name datacheck interactive
```

2) 提交分析运行: 正式提交分析运行, 分析过程中的详细迭代信息及可能的出错信息将存储在 job-name.msg 或 job-name.sta 文件中。

应用命令行方式进行.inp 文件的提交运行的方法为, 在 Abaqus 命令行窗口输入命令:

```
abaqus job=job-name interactive
```

如先前已进行过该模型的数据检查, 可直接输入命令:

```
abaqus job=job-name continue interactive
```

## 3.7 Abaqus 用户子程序文件

### 3.7.1 Abaqus 用户子程序

Abaqus 用户子程序 (user's subroutine) 是指为扩展 Abaqus 的功能, 程序预留的接口, 用户可以通过用户子程序对相应的载荷条件、边界条件、材料特性、接触条件等进行自定义设置, 编写自定义程序。Abaqus 给用户提供了功能强大、使用方便的二次开发工具和接口, 使用户可以方便地进行自定义分析, 满足特定工程问题的需要。Abaqus 6.11 中有 40 多个子程序接口, 本书不再一一详述, 下面介绍焊接过程模拟中可能会用到的子程序。

#### (1) Abaqus/Standard 中的子程序

- 1) CREEP: 定义和时间相关的、黏塑性的行为 (蠕变和膨胀)。
- 2) DFLUX: 在热传递和质量扩散分析中, 定义非均匀的分布流量。
- 3) DISP: 自定义边界位移条件。
- 4) DLOAD: 指定力学非均匀分布载荷。
- 5) FILM: 在热传递分析中指定非均匀的膜散热系数和相应的热沉温度。
- 6) FRIC: 定义接触面摩擦行为。
- 7) GAPCON: 在完全耦合温度-变形分析或者纯热传递分析中, 定义接触面或节点间的导热系数。
- 8) GAPELECTR: 在耦合热电分析中, 定义表面间的电导率。
- 9) HARDINI: 定义初始等效塑性应变和初始背应力张量。
- 10) HETVAL: 在热传递分析中定义内部热生成。
- 11) MPC: 定义多点约束。
- 12) ORIENT: 为定义局部材料方向、运动耦合约束的局部方向及惯性释放的局部刚体方向提供定位。
- 13) SDVINI: 定义与初始求解相关的状态变量。
- 14) SIGINI: 定义初始应力场。
- 15) UEL: 自定义单元。
- 16) UEXPAN: 自定义材料热膨胀系数。
- 17) UFIELD: 指定预定义的场变量。
- 18) UHARD: 在各向同性塑性模型或组合硬化模型中, 定义屈服面尺寸和硬化系数。
- 19) UINTER: 为接触面定义表面相互作用。



- 20) UMAT: 自定义材料的力学行为。
  - 21) UMATHT: 自定义材料的热行为。
  - 22) UMESHMOTION: 在自适应的网格划分中, 指定网格运动约束。
  - 23) URDFIL: 读取结果文件。
  - 24) UTEMP: 自定义温度。
  - 25) UVARM: 输出单元变量。
- (2) Abaqus/Explicit 中的子程序
- 1) VDLOAD: 定义非均布力学载荷。
  - 2) VFRIC: 对接触面定义摩擦行为。
  - 3) VUINTER: 在接触面之间定义相互作用。
  - 4) VUMAT: 自定义材料的力学行为。

### 3.7.2 用户子程序的编写

Abaqus 的用户子程序是用户应用 FORTRAN 语言编写的程序。在一个算例中, 用户可以用到多个用户子程序, 但必须把它们放在一个以 .for (或 .f) 为扩展名的文件中。

Abaqus 中用户子程序的格式及参数表都是规定好的, 不可以随意更改, 一般其标准格式如下:

```
SUBROUTINE <子程序名> (参数列表)
```

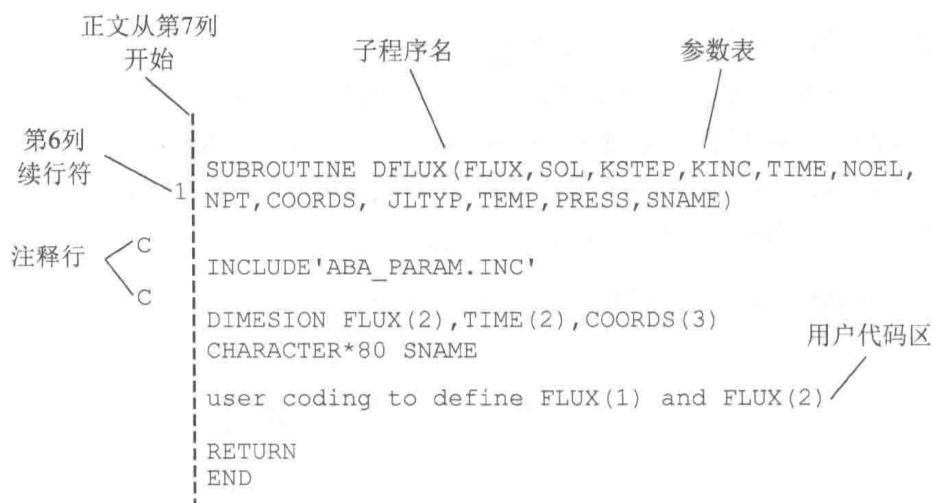
用户在应用 FORTRAN 语言编写子程序时需要注意以下几点:

- 1) FORTRAN 语言中不区分大小写。
- 2) FORTRAN 语言中子程序正文应从第 7 列开始编写, 而第 1~5 列是标号区, 第 6 列是续行标志区。
- 3) 以 “c” 或 “C” 字母开头的行是注释行。
- 4) 空格不参加编译。
- 5) FORTRAN 语言中的 I~N 规则: 一般在未做特殊声明时, 以字母 I、J、K、L、M、N 开头的变量为整型变量, 以其他字母开头的变量为实型变量。
- 6) 由 Abaqus 提供的用户子程序不能嵌套, 即任何用户子程序都不能调用其他用户子程序, 但可以调用用户自己编写的 FORTRAN 子程序和 Abaqus 应用程序。

下面以焊接数值模拟时常用的 DFLUX 子程序为例, 介绍子程序编写的格式规范及各参数含义。

DFLUX 子程序为自定义流密度, 可应用其对焊接热源模型进行定义。其子程

序接口格式如下（其他子程序接口格式可参照 *Abaqus User Subroutines Reference Manual*）：



用户需要做的就是程序区给出流密度定义式。在定义过程中可以应用子程序参数列表中的参数。在子程序的众多参数中，有些是必须由用户给出定义式的，而有些则是由主程序在调用子程序时传入而无须用户定义的。

DFLUX 子程序中需要定义如下参数。

- 1) FLUX (1)：自定义流量密度，用户必须给出定义式。
- 2) FLUX (2)：热流密度随温度或物质浓度的变化率，可以不给出定义。

调用时传入如下参数。

1) KSTEP、KINC：Abaqus 计算过程中当前的 STEP 和 INCREMENT 值，此数值为整数。

2) TIME (1)、TIME (2)：当前分析步的时间 (step time) 和当前增量步的时间 (increment time)。

3) NOEL、NPT：积分点所在单元的编号和积分点的编号。

4) COORDS：当前积分点的坐标，是一个由 3 个元素组成的数组，COORDS (1)、COORDS (2)、COORDS (3) 分别为积分点的  $x$  轴坐标、 $y$  轴坐标和  $z$  轴坐标。

5) JLTYP：体热流/面热流标号，在面热流作用时取 0，在体热流作用时取 1。

6) TEMP：积分点当前温度。

7) PRESS：积分点当前压力值。

8) SNAME：作用面的名称。

### 3.7.3 用户子程序的执行

运行带有用户子程序的作业有两种方法：

一种方法是在 Abaqus/CAE 中运行，在 Module 下拉列表中选择 Job 选项，在菜单栏中选择 Job→Edit Job 命令，打开 Edit Job 对话框，在 General（一般）任务页面的 User subroutine file 列表框中选择用户子程序所在的文件，然后提交计算。

另一种方法是在 Abaqus 命令行中运行，语法如下：

```
abaqus job =<.inp job 文件名> user= <.for 子程序文件名> interactive
```

## 3.8 ANSYS Fluent 软件简介

Fluent 软件是由美国 Fluent 公司于 1983 年推出的计算流体力学软件，是目前计算流体力学领域公认的功能较全面、适用范围较广的软件包之一。2006 年 5 月，Fluent 并入大型通用有限元软件——ANSYS，所有的 Fluent 功能都可集成在 ANSYS Workbench 操作环境下，共同分享完善的 ANSYS 通用 CAE 技术。

Fluent 软件采用基于完全非结构化网格的有限体积法，而且具有基于网格节点和单元的梯度算法。Fluent 软件具有强大的网格支持能力，支持界面不连续的网格、混合网格、动/变形网格及滑动网格等。值得强调的是，Fluent 软件还拥有多种基于解的网格的自适应、动态自适应技术，以及动网格与网格动态自适应相结合的技术。Fluent 软件包含基于压力的分离求解器、基于压力的耦合求解器、基于密度的隐式求解器、基于密度的显式求解器。多求解器技术使 Fluent 软件可以用来模拟从不可压缩到高超音速范围内的各种复杂流场。Fluent 软件包含非常丰富、经过工程确认的物理模型，可以模拟高超音速流场、转捩、传热与相变、化学反应与燃烧、多相流、旋转机械、动/变形网格、噪声、磁流体等复杂机理的流动问题<sup>[39]</sup>。

## 3.9 Fluent 计算流程

在应用 Fluent 进行模拟计算的过程中，无论是瞬态问题、稳态问题、传热问题还是流动问题，其在求解过程中都是类似的。下面对各个步骤做一个简单的

描述。

1) 创建模型并划分网格。Fluent 从 6.3 版本后一律不再使用 GAMBIT 作为前处理网格划分软件, 转而标配 ICEM-CFD 进行网格划分。也可以使用第三方软件(如 Hypermesh)进行模型的创建与网格的划分, 然后将网格导入 Fluent 进行后续计算。

2) 运行合适的解算器。可根据模型特点和精度要求选用 2D、3D, 单、双精度解算器。

3) 读入网格。将划分好的网格读入 Fluent 软件。

4) 检查网格。通过对导入的网格进行检查, 可以获得体积统计数据及连通性等相关信息。

5) 选择合适的求解器。在 Fluent 软件中有两种求解器(基于压力和基于密度)。

6) 选择需要求解的基本模型方程: 层流还是湍流(无黏)、化学组分还是化学反应、热传导模型等。

7) 指定材料的物理性质。

8) 指定边界条件。

9) 如果需要, 编写基于 C 语言的用户自定义程序。

10) 调节解的控制参数。通过对松弛因子的调整来提升解的收敛速度。

11) 初始化流场。根据模型的特点寻找一个恰当的初始解。

12) 计算求解。

13) 保存结果。对计算结果进行保存, 如果有需要, 可以通过改变网格分布、边界条件、热物性参数等多种方式对计算中的模型进行优化处理。

14) 后处理。

## 3.10 Fluent 的初步使用

### 3.10.1 Fluent 的启动与主界面

在 Windows 操作系统中选择“开始”→“所有程序”→ANSYS xx→Fluid Dynamics→Fluent xx 命令, 打开 Fluent Launcher (Fluent 启动) 对话框, 如图 3-15 所示。

在 Dimension (维度) 下可选择 2D 或 3D; 在 Options (选项) 下可选择计算精度为单精度或双精度, 程序默认为单精度计算; Display Options (界面显示选项) 一般选择默认即可; 更多设置下可对程序的 Version (版本)、Working Directory

(工作目录)、Fluent Root Path (启动路径)、Parallel Settings (并行计算类型), 以及用户自定义程序的编译环境等进行设置。

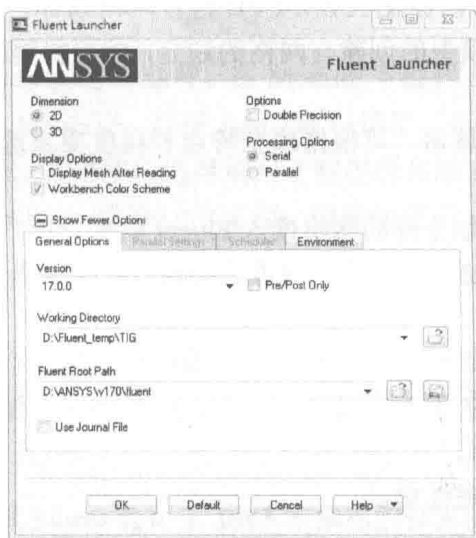


图 3-15 Fluent Launcher 对话框

设置完毕后, 单击 OK 按钮, 弹出 Fluent 主界面, 如图 3-16 所示。

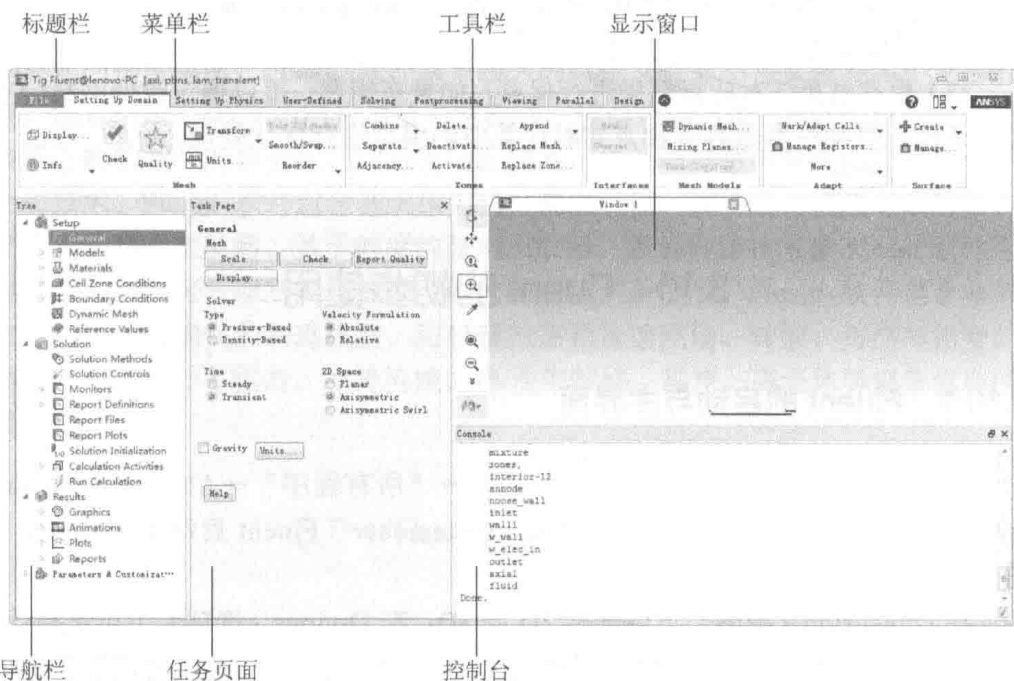


图 3-16 Fluent 主界面

### 3.10.2 Fluent 读入与检查网格

通过在 Fluent 主界面选择 File→Read→Mesh 命令来读入由 ICEM-CFD 或其他第三方软件划分好的、符合 Fluent 格式要求的网格。Fluent 还可以通过读入 Case 和 Data 文件的形式读入网格。一般来说，一个 Case 文件包括网格、边界条件和求解参数的设置，而 Data 文件则包含计算的结果。除此之外，Fluent 还可以通过选择 File→Import 命令导入其他常用软件文件格式的方法导入计算模型。

读入网格之后要进行网格质量的检查，操作方法是在 General 任务页面的 Mesh 选项组中单击 Check (检查) 按钮，或者在菜单栏中选择 Mesh→Check 命令。命令执行后，用户会在文本窗口看到结果统计信息。必须留意统计信息中的最小体积信息，如最小体积为负，则需要重新进行网格划分。

### 3.10.3 物理模型的选择

Fluent 提供了丰富的物理模型供用户选择。在导航栏中选择 Models 选项，进入 Models 任务页面，如图 3-17 所示。根据需要选择相应的物理模型即可，这些模型包括 Multiphase (多相流模型)、Energy (能量方程)、Viscous (基本流动模型)、Radiation (辐射模型)、Heat Exchanger (换热器模型)、Species (组分传输模型)、Discrete Phase (离散相模型)、Solidification & Melting (熔化与凝固模型)、Acoustics (噪声模型) 及 Electric Potential (电势模型)。

在 Models 任务页面选择相应模型后双击或单击下方的 Edit 按钮，可以对模型参数进行设置。

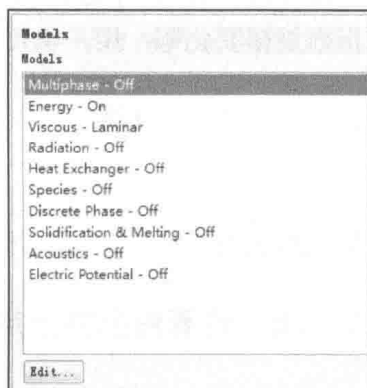


图 3-17 Models 任务页面

### 3.10.4 材料属性设置

Fluent 提供了丰富的材料数据库供用户选择或自定义材料属性。在导航栏中选择 Materials 选项，进入 Materials 任务页面，在其中可以看到当前导入或自定义的材料列表，单击任务页面下方的 Create/Edit 按钮，打开 Create/Edit Materials 对话框，如图 3-18 所示。

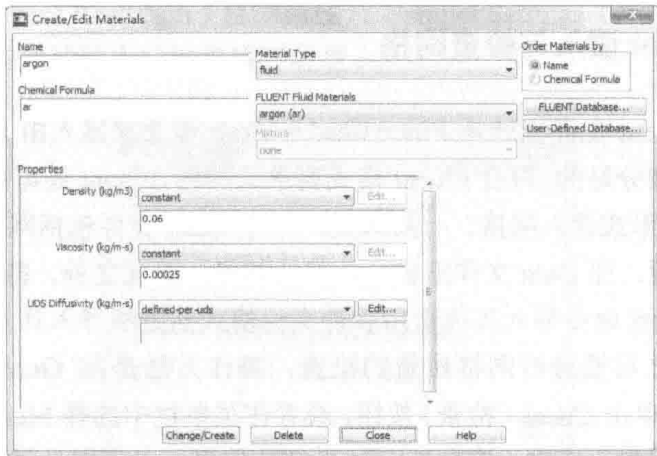


图 3-18 Create/Edit Materials 对话框

用户可以单击 FLUENT Database (FLUENT 数据库) 按钮, 在 Fluent 自带的材料库中选择相应的材料, 也可以单击 User-Defined Database 按钮自定义材料属性。用户还可通过 Properties 选项组的相应选项对每种性能参数在计算过程中的变化规律进行设定。Fluent 提供了常见的变化规律, 如按常数、分段线性、多项式、指数规律变化等, 用户也可以通过自定义程序对材料的参数进行设置。

### 3.10.5 相的设定

在进行多相流计算时, 需要对各个相进行定义, 在导航栏中选择 Phases (相) 选项对相进行设定, 为各个相指定相应的材料, 并对各相间的相互作用进行设定。

### 3.10.6 计算域条件设定

在导航栏中选择 Cell Zone Conditions (区域条件) 选项对各个计算区域 (如固体区、流体区) 的计算参数进行设置, 如区域的运动、多孔介质、反应及源项等。

### 3.10.7 边界条件设定

在导航栏中选择 Boundary Conditions (边界条件) 选项对边界条件进行设置。Fluent 中的边界主要包括以下几种类型。

1) 速度入口边界 (velocity-inlet)。要求给出流体入口的速度, 该边界适用于不可压缩流体。同时, 还可对注入流体的温度、组分、辐射及湍流属性进行设置。

2) 压力入口边界 (pressure-inlet)。需要给出流体入口的压力值, 该边界不但

适用于不可压缩流体，也同样适用于可压缩流体。其他属性设置同上。

3) 质量入口边界 (mass-flow-inlet)。需要给定入口边界的质量注入量。该边界主要应用于可压缩流体问题，对于不可压缩流体，由于其密度是常数，可换算为速度入口边界。

4) 压力出口边界 (pressure-outlet)。需给定出口的表压。

5) 自由出口边界 (outflow)。在无法给定出口处的速度或压力时，可以选择自由出口边界。

6) 固壁边界 (wall)。

此外，Fluent 还提供了压力远场、进口通风、进口风扇、出口通风及排气扇等边界，这里不再一一详述。

### 3.10.8 动网格设置

在导航栏中选择 Dynamic Mesh (动网格) 选项对动网格进行设置。它主要用来模拟由流域边界的运动引起的流体流动情况。动网格的实质就是网格的重构与更新，Fluent 提供了 3 种局部网格更新方法：Smoothing (网格光滑更新)、Layering (网格分层) 及 Remeshing (网格重新划分)，并可对网格更新参数进行设置。

### 3.10.9 参考值设置

在导航栏中选择 Reference Values (参考值) 选项对参考值进行设置。参考值用来计算一些流场变量，如阻力系数等，参考值的设定并不影响计算求解过程，而只对后处理相关计算具有影响。用户可以通过手动输入各参考值，也可以通过特定边界区域计算得到各参考值。

### 3.10.10 求解器算法设置

在导航栏中选择 Solution Methods (求解算法) 选项，进入 Solution Methods 任务页面，如图 3-19 所示。在该任务页面中，首先要指定压力速度耦合方法，在分离求解器中，Fluent 提供了 3 种压力速度耦合方法：SIMPLE、SIMPLEC 及 PISO。对于定常状态计算，一般使用 SIMPLE 方法或 SIMPLEC 方法；对于过渡计算，推荐使用 PISO 方法。PISO 方法还可以用于高度倾斜网格的定常状态计算和过渡计算。



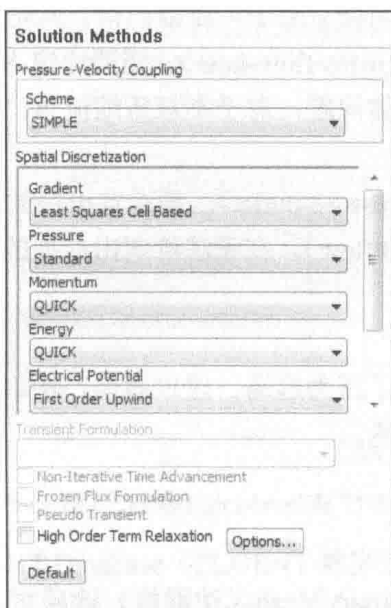


图 3-19 Solution Methods 任务页面

同时，在该任务页面中还可设置各物理求解方程的离散格式。此部分具体操作方法请参考帮助文档。

### 3.10.11 求解参数设置

在导航栏中选择 Solution Controls（求解控制）选项，进入 Solution Controls 任务页面，如图 3-20 所示。用户可能通过设置各物理方程的松弛因子控制收敛速度。在流体力学计算中求解物理量的非线性方程，控制变量在每次迭代中的变化是很必要的，这就要通过松弛因子来实现。松弛因子通过控制变量在每次迭代中的变化，达到控制收敛速度、改善收敛状况的目的。

松弛因子大于 1 时，为超松弛因子，可以加快收敛速度；松弛因子小于 1 时，为欠松弛因子，可以改善收敛性；松弛因子为 1 时，相当于不使用松弛因子。Fluent 中使用的就是欠松弛因子，主要是为了防止两次迭代值相差太大引起发散。

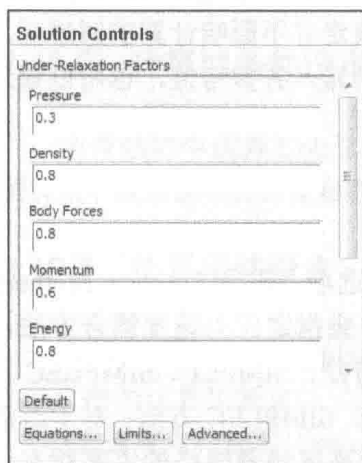


图 3-20 Solution Controls 任务页面

欠松弛因子的取值在 0~1 范围内, 越小表示两次迭代值之间的变化越小, 也就越稳定, 但收敛也就越慢。

### 3.10.12 求解监视窗口设置

在导航栏中选择 Monitors (监视器) 选项对监视器窗口进行设置, 用户可通过设置来实时监视点、线、面或体上各物理量 (如压力、速度、温度、流量等) 的收敛历史, 并绘制成曲线。

### 3.10.13 初始化设置

Fluent 在迭代计算之前要初始化流场, 即为求解方程提供一个初始解。对于稳态问题, 由于无须求解瞬态项, 因此初始值不会对计算结果产生影响, 但会影响迭代求解的收敛速度。而对于瞬态问题, 则需要设置初始值。用户可通过选择导航栏中的 Solution Initialization (求解初始化) 选项对初始值进行设置。Fluent 有 3 种方式进行初始化: ①从某个边界计算初始值; ②使用全局计算初始值; ③手动给定初始值。设置完成后, 单击 Initialize 按钮完成初始化。

### 3.10.14 运算设置

在导航栏中单击 Calculation Activities (计算活动) 选项, 进入 Calculation Activities 任务页面, 如图 3-21 所示。在该任务页面中可以设置自动保存频率及计算过程中要执行的多种任务, 如保存、导出文件、结果动画等。



图 3-21 Calculation Activities 任务页面

### 3.10.15 运行计算设置

在导航栏中选择 Run Calculation（运行计算）选项，进入 Run Calculation 任务页面，如图 3-22 所示。用户可以单击 Check Case（检查算例）按钮对设定模型的网格、边界条件、材料及求解参数的设置进行检查，还可以手动设定迭代步数及步长等计算相关参数。



图 3-22 Run Calculation 任务页面

### 3.10.16 结果设置

Fluent 自带后处理功能，可分别通过导航栏 Results（结果）选项下的 Graphics and Animations（图形与动画）任务页面、Plots（绘制）任务页面和 Reports（报告）任务页面进行相关设置。

## 3.11 Fluent 用户自定义程序

### 3.11.1 UDF 概述

用户自定义程序（user defined functions, UDF）是 Fluent 为扩展其功能而为用户提供的二次开发接口<sup>[40]</sup>，其功能类似于 Abaqus 中的用户子程序。UDF 通过大量的宏定义来帮助用户与 Fluent 求解器中的数据进行交互，完成标准 Fluent 界面中无法实现的功能。例如，通过 UDF 可以定制复杂边界条件，设置输运方程源

项、材料属性、反应速率，以及完成求解的初始化定义等。

编写 UDF 有如下要求。

- 1) 采用 C 语言编写。
- 2) 必须在源码中声明包含 `udf.h` 头文件。
- 3) 必须使用 ANSYS Fluent 公司提供的 `DEFINE` 宏来进行宏定义。
- 4) 必须使用 ANSYS Fluent 公司提供的预定义宏和函数来访问求解器数据。
- 5) UDF 中的数据采用 SI 单位制。

### 3.11.2 Fluent 中的网格拓扑

Fluent 的求解器是在有限体积法基础上进行相关运算的，这种方法将计算域离散为有限的控制体，也就是网格单元，因此，了解 Fluent 中的网格拓扑是使用 UDF 并与求解器进行数值交互的前提。如图 3-23 所示为 Fluent 中的基本网格拓扑。

其中，单元 (cell) 指区域被分割成的控制容积。单元中心 (cell center) 为场数据存储的地方。面 (face) 指单元的边界，2D 网格中的面体现为线单元，3D 网格中的面体现为二维单元。边 (edge) 指 3D 区域的边界。节点 (node) 指网格节点。

Fluent 中有一些特殊的数据类型，Thread (线索) 就是 Fluent 中重要的数据结构之一，它充当了一个与它描述的单元或面的组合相关的数据集合。例如，单元线索 (cell thread) 是指在其中分配了材料数据和源项的单元集合，面线索 (face thread) 是指在其中分配了边界数据的面集合，节点线索 (node thread) 指节点集合等。区域 (domain) 是 Fluent 中最高水平的数据结构，它充当了一个与网格中所有节点、面和单元线索组合相关的数据容器。

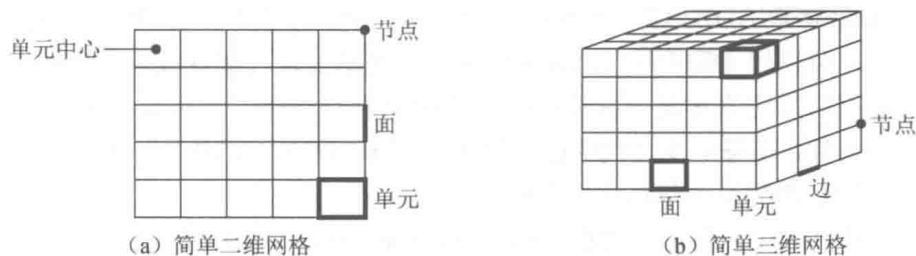


图 3-23 Fluent 中的基本网格拓扑

### 3.11.3 UDF 中的自定义函数

Fluent 中提供了大量的预定义函数来方便用户进行数据访问与功能定义，这

些预定义函数称为宏。在 UDF 中用户需要应用特定的宏——DEFINE 宏来定义函数，完成自己想要的功能。DEFINE 宏的通用格式为

```
DEFINE_MACRONAME (udf_name, passed-in variables)
{
    Function body
}
```

这里，MACRONAME 为 Fluent 规定的宏名，全部大写且名称不可更改。例如，DEFINE\_PROFILE 用来定义边界条件，DEFINE\_SOURCE 用来定义源项等。具体宏名及相应的功能可参阅 UDF 帮助文档。

DEFINE 宏小括号内为参量，第一个参量为用户自定义程序名，必须全部为小写字母。一旦 UDF 被编译并加载，则此自定义程序名会出现在 Fluent 相应任务页面的下拉列表中，供用户选择。括号内后面的参量为传入参数，计算过程中从 Fluent 求解器传递到函数体中。注意：DEFINE 宏所有参量必须在同一行内，如果分为几行将导致编译错误。DEFINE 宏的大括号部分为自定义函数体，函数体可以返回变量，也可以不返回变量。

DEFINE 宏按完成的功能一般包括通用求解宏、模型指定宏、多相流模型宏与离散相模型宏。下面简要介绍与本书相关的通用求解宏与模型指定宏。

1) DEFINE\_INIT (name, d) 为一种常用的通用求解宏，主要用来定义一组解的初始值。其作用与 patch 修补功能一样，只是它以另一种方式——UDF 来完成。每一次初始化时，DEFINE\_INIT 函数都会被执行一次，因此常用于设定初始值。DEFINE\_INIT 函数具有两个参量，其中 name 为自定义函数的名称；d 为一个指向作用区域的指针。

2) DEFINE\_ADJUST (name, d) 是一个用于调节和修改 Fluent 变量的通用宏。例如，可以用 DEFINE\_ADJUST 来修改流动变量（如速度、压力），并计算积分；也可以用它来对某一标量在整个流场上进行积分，然后在该结果的基础上调节边界条件。在每一步迭代中都可以执行用 DEFINE\_ADJUST 定义的宏，并在解输运方程之前的每一步迭代中调用它。

上述两种通用求解宏均需在 User-Defined Function Hooks 对话框中激活使用。

模型指定宏用来为特定的模型设置参数。例如，指定边界条件、设定材料属性及输运方程源项等。在 Fluent 中共有 10 多个模型指定宏，下面仅介绍与本书相关的几个模型指定宏。

1) DEFINE\_DIFFUSIVITY (name, c, t, i) 宏用来指定组元输运方程或用户自定义标量输运方程的扩散率。它共有 4 个参数，其中 name 为用户指定的自定

义函数名,  $c$  为作用线索中的单元,  $t$  为指向作用线索的指针,  $i$  为组分或自定义标量号。DEFINE\_DIFFUSIVITY 宏需要在相应 Materials 任务页面激活。

2) DEFINE\_PROFILE ( $name, t, i$ ) 宏来自定义边界条件, 如指定随位置坐标或时间变化的边界条件等。它有 3 个参数, 其中  $name$  为用户指定的自定义函数名,  $t$  为指向作用线索的指针,  $i$  为此 UDF 关联时指定的边界变量。DEFINE\_PROFILE 宏需要在 Boundary Conditions 任务页面激活。

3) DEFINE\_PROPERTY ( $name, c, t$ ) 宏来自定义材料属性, 如密度、黏度系数、热导率等。它有 3 个参数, 其中  $name$  为函数名, 在 UDF 编译加载后, 函数名会出现在 Materials 任务页面中;  $c$  为指定线索单元索引;  $t$  为指向已定义材料属性的线索指针。

4) DEFINE\_SOURCE ( $name, c, t, dS, eqn$ ) 宏专门用来定义输运方程中的源项, 可为连续性方程、动量方程、能量方程等设定源项。它有 5 个参数, 其中  $name$  为函数名,  $c$  为指定线索单元索引,  $t$  为指向作用线索的指针, 数组  $dS$  为相应源项的导数,  $eqn$  为数组元素的编号。

### 3.11.4 编译与加载 UDF

在应用 UDF 进行计算时, 有两种方式将 UDF 源程序编译并加载到 Fluent 计算中, 即解释型 UDF (interpreted UDFs) 和编译型 UDF (compiled UDFs)。

解释型 UDF 使用相对简单, 不需要在计算机中安装 C 语言编译器, 源程序被编译成与体系结构无关的中间代码或伪码。这一代码调用时是在内部模拟器或解释器上运行的。与体系结构无关的代码牺牲了程序性能, 使其执行速度较慢, 但这种 UDF 比较易于在不同的操作系统和 Fluent 版本之间共享。Fluent 中生成解释型 UDF 的操作为选择 Define→User-Defined→Functions→Interpreted 命令, 打开图 3-24 所示 Interpreted UDFs 对话框, 在其中进行相关设置。

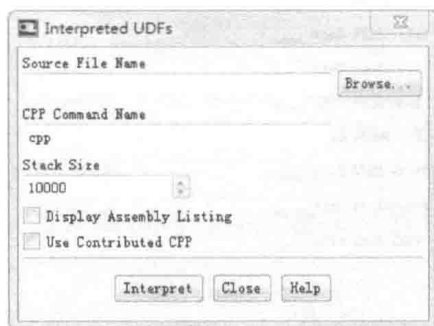


图 3-24 Interpreted UDFs 对话框

编译型 UDF 需要由 C 语言编译器编译成本地目标码，其执行速度较快，也没有源程序的限制，可以使用所有的 C 语言功能。此编译过程须在 Fluent 正式计算之前完成。在 Fluent 计算时会执行存放于共享库里的目标码，这一过程称为动态装载。

在 Fluent 中生成解释型 UDF 的操作如下。

依次选择 Define → User-Defined → Functions → Compiled 命令，在打开的 Compiled UDFs 对话框中，单击 Source Files（源文件）下面的 Add 按钮找到源程序并加入，为编译后的库文件命名，然后单击 Build 按钮编译，最后单击 Load 按钮装载，如图 3-25 所示。

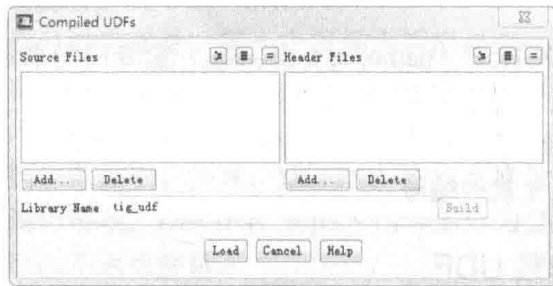


图 3-25 Compiled UDFs 对话框

对于初始值设定及计算值已调整的 UDF，激活时需选择 Define → User-Defined → Function Hooks 命令，打开图 3-26 所示的 User-Defined Function Hooks 对话框。

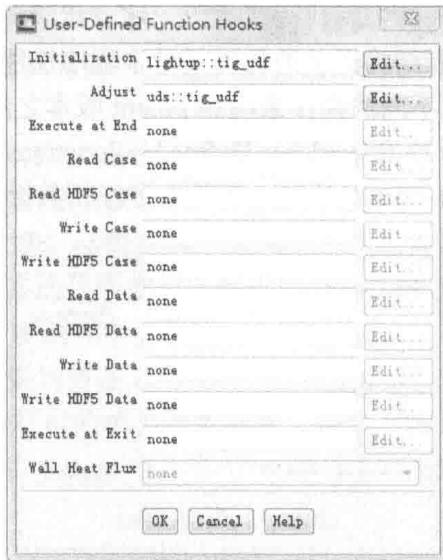


图 3-26 User-Defined Function Hooks 对话框

### 3.12 用户自定义内存变量

为了方便将 UDF 计算过程中产生的中间变量记录保存下来，或者用于后处理，可将这些变量编号并存入内存，这些自定义的内存变量称为用户自定义内存（user-defined memory, UDM）。在 Fluent 中允许设定多达 500 个自定义内存变量。

为定义内存变量，应首先选择 Define→User-Defined→Memory（用户定义内存变量）命令，打开图 3-27 所示的 User-Defined Memory 对话框，在其中指定内存变量的数量。

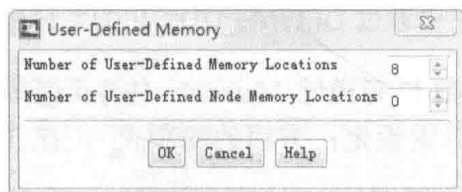


图 3-27 User-Defined Memory 对话框

在 UDF 中用户可以使用 C\_UDMI 或 F\_UDMI 预定义宏访问单元或面中的内存变量。

存储在用户定义内存中的场值将与计算场值一并存入结果 Data 文件中。这些场值将出现在后处理面板的下拉列表中，并标记为 udm-0、udm-1 等。用户可以和处理正常场值一样对其进行显示、计算、动画演示等后处理操作。

### 3.13 用户自定义标量

在 Fluent 中用户可以定义用户自定义标量（user-defined scalar, UDS），并在给定输运方程的情况下利用 Fluent 求解器求解。例如，磁流体动力学模拟中的磁场变量就可以使用 UDS 进行求解。

对于任意的自定义标量，在流体力学计算中一般可写成标准输运方程形式，即

$$\frac{\partial \rho \phi_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\psi} \phi_k - \Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \right) = S_{\phi_k}$$



式中,  $\phi_k$ ——待求解的自定义量;

$t$ ——时间;

$x_i$ ——某坐标方向;

$\rho$ ——流体密度;

$\bar{\psi}$ ——通量;

$\Gamma_k$ ——扩散率;

$S_{\phi_k}$ ——方程源项。

标准输运方程中的  $\frac{\partial \rho \phi_k}{\partial t}$  项称为方程的非稳态项、时间项, 在 UDF 中通过

DEFINED\_UDS\_UNSTEADY 宏进行设定, 在定常流动中并无此项;  $\frac{\partial}{\partial x_i} \bar{\psi} \phi_k$  称为

方程的对流项, 在 UDF 中通过 DEFINE\_UDS\_FLUX 设定;  $\frac{\partial}{\partial x_i} \Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i}$  称为方程

的扩散项, 其中扩散系数  $\Gamma_k$  可通过 Materials 任务页面指定或者在 UDF 中通过 DEFINE\_DIFFUSIVITY 宏设定; 方程的源项  $S_{\phi_k}$ , 在 UDF 中通过 DEFINE\_SOURCE 设定。

为定义求解 UDS, 应首先选择 Define→User-Defined→Scalars (用户定义标量) 命令, 打开图 3-28 所示的 User-Defined Scalars 对话框, 在其中选择自定义标量的数量。

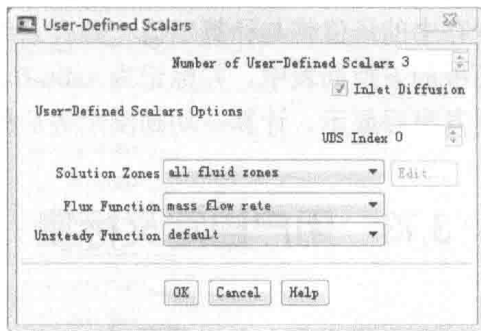


图 3-28 User-Defined Scalars 对话框

Fluent 规定 UDS 最大数目为 50。在 User-Defined Scalars 对话框中有对流项及非稳态项的设定。设定完成后还需要指定 UDS 在模型边界处的边界值。例如, 选择 Define→Boundary Conditions 命令, 打开图 3-29 所示的 Wall 对话框, 在其中 UDS 选项卡可以为每个标量在边界处指定一个特定的值 (specified value) 或特定的通量 (specified flux)。



图 3-29 Wall 对话框 UDS 设定

如果 UDS 输运方程中含有源项，则需要用户在 Fluid 对话框的 Source Terms (源项) 选项卡中为其指定相应的源项数值或自定义函数，如图 3-30 所示。

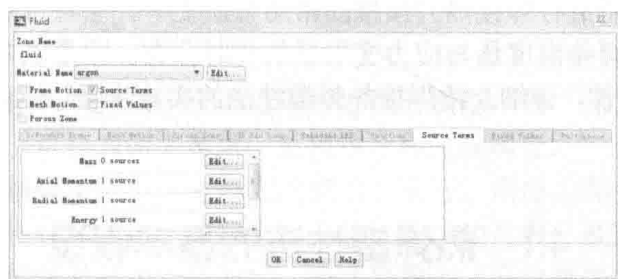


图 3-30 Fluid 对话框源项设置

计算完成后，用户可通过正常的后处理程序对 UDS 结果数据进行后处理操作。

## 第 4 章

# 焊接热力模拟——热弹塑性法

热弹塑性法在进行焊接热力模拟的常用方法之一，它可以实时跟踪整个焊接热力过程，得出焊接温度场与应力变形场的实时分布。本章以电弧焊为例，基于 Abaqus 有限元软件，详细介绍焊接热弹塑性法的实施步骤、注意事项，并附以实例说明。

### 4.1 热弹塑性法的基本假设

采用热弹塑性法进行焊接热力有限元分析一般存在以下几个基本假设：

- 1) 假设焊缝及母材为连续固体，在固体力学范畴内进行分析。
- 2) 仅考虑材料的率无关弹塑性，忽略材料率相关性能及黏性。
- 3) 材料屈服行为服从米泽斯 (Mises) 屈服准则。
- 4) 进入塑性区的材料行为服从塑性流动法则和硬化法则。

### 4.2 热源参数及材料性能参数

以弧焊热弹塑性法模拟为例，在进行模拟计算前，除了应了解模拟对象的几何参数外，还必须知道的参数包括热源参数及材料性能参数。

- 1) 热源参数。如选取平面高斯热源为热源模型，其热流密度函数如下：

$$q(r) = q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{R_0^2}\right), \quad q_m = \frac{3\eta UI}{\pi R_0^2} \quad (4-1)$$

式中，各物理量的含义见 2.1.2 节。因此，应了解的参数包括焊接电流  $I$ 、焊接电

压  $U$ 、焊接热源的热效率  $\eta$  和电弧有效加热半径  $R_0$ ，此外，还应包括描述热源运动的焊接速度  $v$ 。

2) 材料性能参数。材料性能参数应包括计算温度场时需要的材料热物理性能参数和计算应力变形场时需要的材料机械性能参数。

一般地，材料的热物理性能参数有材料的热导率、密度、比热容、潜热和热膨胀系数等；材料的机械性能参数有材料的弹性性能参数（包括弹性模量和泊松比）和塑性性能参数（包括屈服和硬化规律）。

## 4.3 模拟过程中需要注意的问题

### 4.3.1 热力耦合方式的选取

焊接热力模拟的实质是一个热力耦合过程的模拟，而“热”和“力”两种物理场在耦合方式上可分为两大类型：直接耦合和间接耦合。

直接耦合是指焊接热会产生相应的应力和变形，而应力和变形反过来还会影响热的产生。其在计算上是一个耦合在一起、统一的过程，经过一次计算即可得到完整的焊接温度场及应力和变形场。而间接耦合（又称顺序耦合）是指焊接热是产生应力和变形的前提，但应力和变形并不会反过来影响焊接热过程。在这种耦合方式下，一般先计算焊接温度场，然后以温度场计算结果为前提条件，再计算后续焊接应力与变形，是顺序衔接在一起的两个分析过程。

在实际应用过程中，常常使用间接耦合的方式来进行焊接热力模拟计算，这是因为：

1) 在一般的弧焊焊接过程中，由应变产生热的效应并不明显，即由“力”向“热”这一支线的耦合效应比较弱，可以忽略不计（当然在某些焊接方法下，“力”-“热”的耦合效应比较强烈，如搅拌摩擦焊，此时就不宜采用间接耦合的方式进行模拟计算）。

2) 从计算效率方面考虑，直接耦合计算时，需要求解的雅可比矩阵为非对称矩阵，增加了求解时间。因此，对于同一个焊接模型，采用直接耦合进行计算所需的时间要比采用间接耦合所需的时间长得多。

### 4.3.2 热源模型的选择与校核

热源模型及参数的选取对焊接过程的模拟结果有很大影响。第2章中提到，

焊接热源模型可分为体热源模型、面热源模型和组合热源模型。在进行焊接热力过程模拟前,要根据实际的焊接情况选取适当的热源模型。一般的做法是,根据实际焊缝区截面选取合适的焊接热源种类。例如,采用面热源模型计算得到的熔化区深度一般较浅(图 4-1),比较适合于对薄板焊接进行模拟。

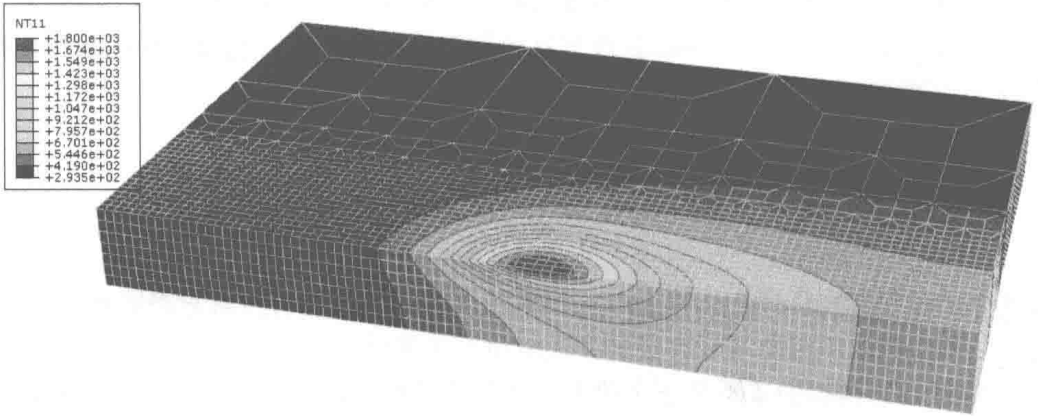


图 4-1 采用面热源模型计算得到的熔化区截面

而对于具有较大熔深焊缝的焊接过程,如厚板焊接、带坡口焊、埋弧焊等,则不宜采用面热源模型,采用双椭球形热源模型可以较好地模拟这些焊接过程,如图 4-2 所示。

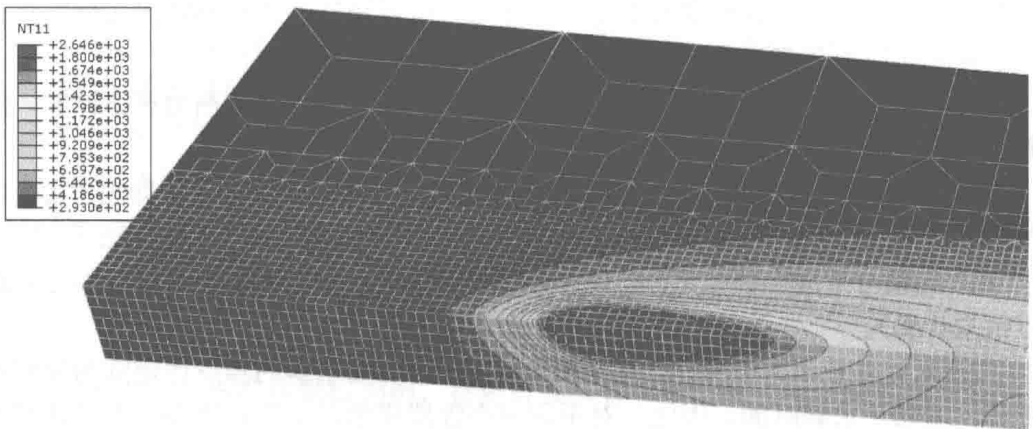


图 4-2 采用双椭球形热源模型计算得到的熔化区截面

对于一些深熔焊,如高能束焊接等,则应考虑采用锥体热源模型或组合热源模型,如图 4-3 所示。

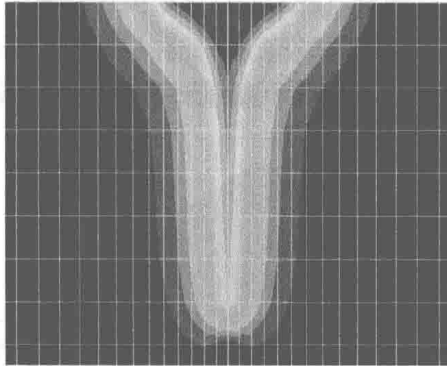


图 4-3 采用组合热源模型得到的熔化区截面

在选取了热源模型种类后，需要对模型参数进行精确校核，才能将其用于模拟计算。

#### (1) 表面高斯分布热源模型的参数校核

表面高斯分布热源模型公式见 2.1.2 节中的式 (2-9)。

对于表面高斯分布热源模型来说，模型函数的自变量是  $r$ ，模型参数有焊接电流  $I$ 、焊接电压  $U$ 、焊接热源的热效率  $\eta$  和电弧有效加热半径  $R_0$ 。除了电弧有效加热半径  $R_0$  外，其余参数可由焊接工艺直接给出。因此，对平面高斯分布热源模型的校核主要是指对有效加热半径  $R_0$  的校核。实际应用过程中通常采用对比实际的熔化区截面半径和计算的熔化区截面半径的方法来确定  $R_0$  的值。一般的经验做法是：如果模拟得到的焊缝熔化区半径比实际略小，则应调小  $R_0$  的值；如果模拟得到的焊缝熔化区半径比实际略大，则应调大  $R_0$  的值。这是因为有效加热半径  $R_0$  反映了热源的集中程度，即  $R_0$  越小，热源越集中，在相同的热流下越容易产生更大的熔化区。

#### (2) 双椭球形体热源模型的参数校核

双椭球形体热源模型公式见 2.1.2 节中的式 (2-12)、式 (2-13)。

对于双椭球形体热源模型，模型参数较多，除由焊接工艺直接给定的焊接电流  $I$ 、焊接电压  $U$ 、焊接热源的热效率  $\eta$  外，还包括前、后两个椭球的共 4 个半轴长  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b$ 、 $c$  及前、后椭球的能量分配系数  $f_1$  和  $f_2$ 。

对于常规的弧焊，采用双椭球形体热源模型时，Goldak 建议取  $f_1 = 0.6$ ， $f_2 = 1.4$ ，而根据实际焊缝的熔宽来确定  $a_1$ 、 $a_2$  与  $b$  的值，根据实际焊缝熔深来确定  $c$  的值，一般取：

$$a_1 = b = 0.5a_2 \approx 0.45W_{\text{width}} \quad (4-2)$$

$$c \approx 0.9W_{\text{depth}} \quad (4-3)$$

式中,  $W_{\text{width}}$ ——实际焊缝宽度(熔宽);

$W_{\text{depth}}$ ——实际焊缝深度(熔深)。

如果在模拟之前并不知道实际焊缝的深度、宽度等参数,也可根据下式近似计算。

薄板场合:

$$r = 0.242 \frac{Q}{c\rho h T} \quad (4-4)$$

厚板场合:

$$r^2 = 0.234 \frac{Q}{c\rho T} \quad (4-5)$$

式中,  $r$ ——熔合区半径;

$Q$ ——焊接线能量;

$c$ ——材料比热容;

$\rho$ ——材料密度;

$h$ ——板厚;

$T$ ——材料熔点。

同样地,如果模拟出的焊缝截面宽度比实际熔宽略大,则应相应加大  $b$  的值,如果模拟出的焊缝深度比实际熔深略大,则应相应调大  $c$  的值;反之亦然。

### 4.3.3 有限元网格大小的选取

有限元网格的数量和密度直接影响计算精度和计算成本。一般地,网格数量增加、网格尺寸减小,会提高计算精度、改善计算的收敛性,但同时计算成本也会增加;而减少网格数量、增大网格尺寸,则会降低计算成本,但有时会影响计算精度,甚至会造成计算的不收敛。所以在确定网格数量时应权衡这两个因素综合考虑。

典型的焊接温度场及过渡化网格划分如图 4-4 所示。

由图 4-4 可见,由于焊接局部加热的特点,较大的温度梯度发生在焊缝及其附近,为了得到精细的计算结果,需要将焊缝及近缝区的网格划分得密一些,而远离焊缝区域由于并不存在较大的温度梯度,可划分得相对粗大一些。值得注意的是,在划分网格时要保证网格的连续,这样才能保证计算变量的连续。图 4-4 即为一种连续过渡型网格划分方法,这种方法既可保证焊缝区域计算的精确,又兼顾了计算的成本。

关于焊缝区域网格的大小,作者的体验是,如果只进行热分析,焊缝区网格尺寸至少应不大于热源模型特征尺寸的一半左右。例如,在某焊接模拟中采用表面高斯分布热源,其特征尺寸  $R_0 = 6\text{mm}$ ,则焊缝区网格大小应小于  $3\text{mm}$ 。再如,

采用双椭球形热源，其特征尺寸  $a_1=7\text{ mm}$ ， $a_2=14\text{ mm}$ ， $b=7\text{ mm}$ ， $c=5\text{ mm}$ ，则取最小特征尺寸  $c$  的一半 ( $2.5\text{ mm}$ ) 比较合适。如果还需进行焊接应力分析、微观组织转变分析等，则需要进一步减小网格尺寸。

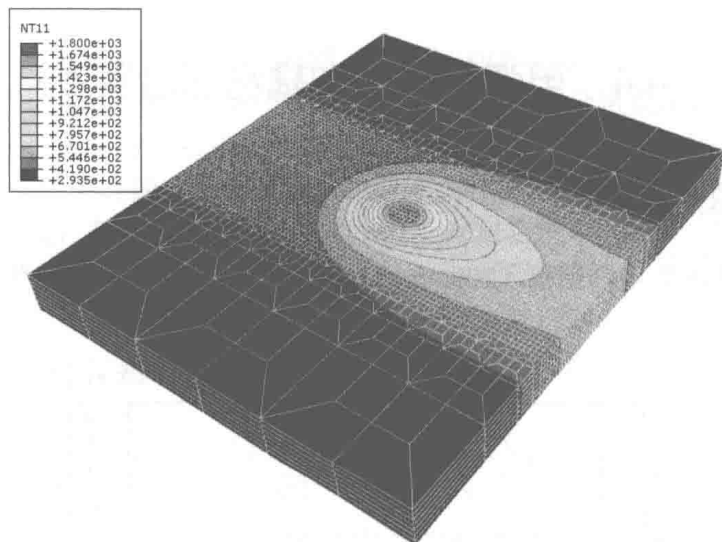


图 4-4 典型的焊接温度场及过渡化网格划分

图 4-5 对比了不同网格尺寸下，采用双椭球形热源模型 ( $a_1=7\text{ mm}$ ， $a_2=14\text{ mm}$ ， $b=7\text{ mm}$ ， $c=5\text{ mm}$ ) 进行焊接温度场分析时的计算时间与计算焊缝熔宽。

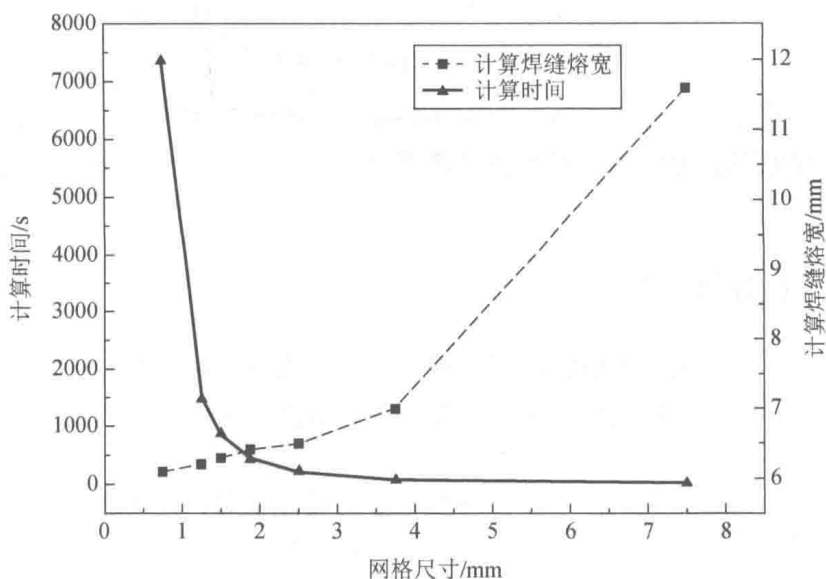


图 4-5 网格尺寸对计算时间与计算焊缝熔宽的对比



由图 4-5 可以看出,随着网格尺寸的减小,计算时间增加,在网格尺寸小于 2.5mm 后,随着网格尺寸继续减小,计算时间迅速增加,而计算焊缝熔宽变幅较小,说明其对计算精度提高影响不大。

## 4.4 电弧焊接热力耦合综合实例

### 4.4.1 问题描述

SUS301L-HT 不锈钢板 (200mm×150mm×3mm), 表面 MIG 堆焊, 如图 4-6 所示。

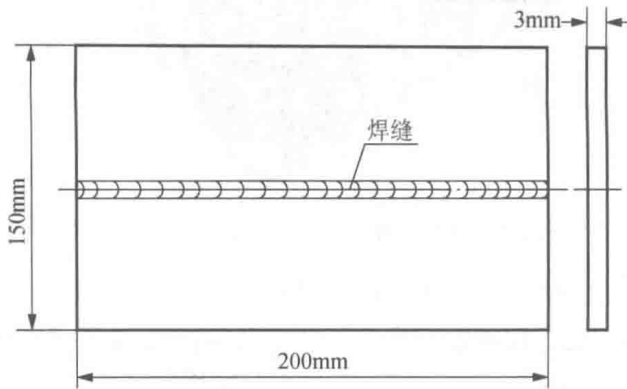


图 4-6 不锈钢板表面 MIG 堆焊示意图

焊接参数: 焊接电流 60A, 电压 16.5V, 焊接速度 250mm/min, 焊接热源的热效率可取 0.75。通过数值模拟得到焊接温度场、应力应变场及焊后残余应力与变形。

### 4.4.2 问题分析

这是一个简单的三维焊接问题,可采用间接耦合方式,分别计算焊接温度场与后续的应力场及焊后变形。鉴于所焊工件为薄板,可采用表面高斯分布热源模型来模拟焊接热源。


首先应在 Abaqus/CAE 中建立模拟对象的几何模型、设定边界等,然后编写热源子程序,提交计算并对计算结果进行观测分析。

### 4.4.3 Abaqus/CAE 温度场分析过程

#### 1. 创建几何体


1) 启动 Abaqus/CAE, 在打开的 Start Session 对话框中选择 Create Model Database→With Standard/Explicit Model 选项, 启用通用分析模块。

2) 在 Module 下拉列表中选择 Part 选项, 进入 Part 模块。

3) 在菜单栏中选择 Part→Create 命令, 或者在工具箱中单击  按钮, 打开图 4-7 所示的 Create Part 对话框。

4) 将部件命名为 Plate, 在 Modeling Space 下选择 3D; 在 Type 下选择 Deformable, 即三维可变形体; 在 Base Feature 下选择 Solid、Extrusion, 即通过截面拉伸获得三维实体模型。

5) 在 Approximate size (估计尺寸) 文本框中输入“800”(这个尺寸大约为模型最大尺寸的 4 倍, 并无固定限制)。单击 Continue (继续) 按钮, 出现画草图界面, 并显示栅格。这时需要画出三维体的一个二维截面。

6) 由于模型根据焊缝中心对称, 建模时只需建立整体平板的一半即可。在工具栏中单击  按钮, 在提示区出现提示后, 分别输入 (0,0) 和 (200,75) 作为矩形截面的两个对角点, 此为三维体的二维矩形截面(即上表面), 然后单击鼠标中键完成截面图形的绘制。

7) 在提示区单击 OK 按钮, 打开 Edit Basic Extrusion 对话框。在对话框的 Depth (深度) 文本框中输入“3”, 即三维模型的厚度为 3mm, 单击 OK 按钮生成三维部件, 如图 4-8 所示。

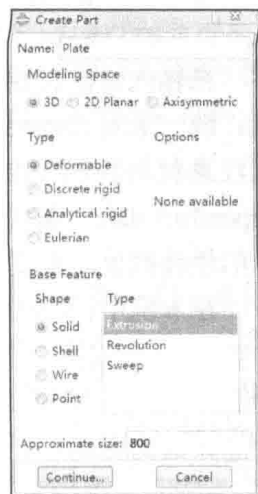


图 4-7 Create Part 对话框

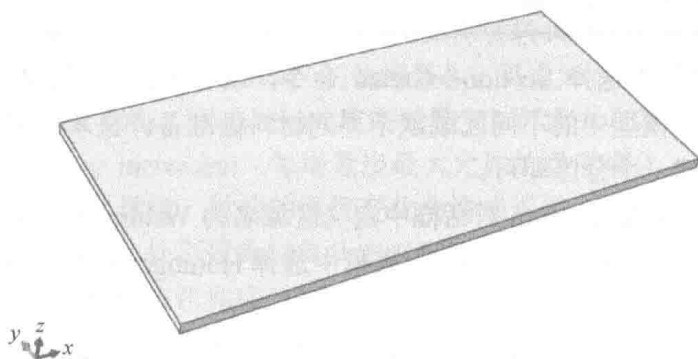



图 4-8 三维部件图

## 2. 设置材料属性

1) 在 Module 下拉列表中选择 Property 选项, 进入 Property 模块, 在菜单栏中选择 Material→Create 命令, 或者在工具箱中单击  按钮, 打开 Edit Material 对话框。


2) 将材料命名为 Steel。由于在间接耦合热力分析中, 第一步的焊接温度场计算是一个热过程分析, 只需要输入材料的热物理性能即可。在 Thermal (热性能) 任务页面的 Conductivity (传导率) 文本框中输入热导率, 在 Specific heat (比热) 文本框中输入比热容, 在 Latent heat (潜热) 文本框中输入潜热, 在 General 任务页面的 Density (密度) 文本框中输入密度。

在输入性能参数的时候, 需要注意两点。一是要做到单位统一, 为了方便起见, 统一采用 mm-t-s 单位, 温度的单位为 K; 二是焊接过程中温度变化剧烈, 需要注意材料性能的温度相关性, 可以通过在性能设置界面勾选 Use temperature-dependent data (使用温度相关数据) 复选框, 来设定相关性能在每个温度点所对应的性能数值。设置完成后, 单击 OK 按钮。

在本例中, SUS301L-HT 不锈钢的密度可取  $7.8\text{E-}9\text{t/mm}^3$  (Abaqus 可采用科学计数法输入数据, 如  $7.8\text{E-}9$  指的是  $7.8 \times 10^{-9}$ ), 并假设其不随温度变化。潜热取  $2.6\text{E}+11$  mJ/t, 固相线温度 1350K, 液相线温度 1723K。其他随温度改变的热物理性能参数见表 4-1。


表 4-1 SUS301L-HT 不锈钢的热物理性能参数

热物理性能参数	温度/K						
	293	473	577	872	1065	1280	1380
热导率 mW/(mm·K)	12.943	15.029	18.334	20.944	23.318	26.591	27.324
比热容 mJ/(t·K)	4.13E8	4.54E8	5.05E8	5.5E8	5.52E8	6.0E8	5.79E8

3) 在菜单栏中选择 Section→Create 命令, 或者在工具箱中单击  按钮创建区域属性, 即为模型中的不同区域赋予不同材料做准备。在本例中模型为一个均质体, 所以创建一个分区即可。

在打开的 Create Section 对话框中定义区域名为 Weldment, 在 Category 选项组中勾选 Solid 单选按钮, 在 Type 列表框中选择 Homogeneous (各向同性) 选项, 单击 Continue 按钮。


4) 在打开的 Edit Section 对话框中选择第 2) 步建立的 Steel 作为材料, 单击 OK 按钮完成创建。

5) 在菜单栏中选择 Assign→Section 命令, 或者在工具箱中单击  按钮, 即将建立的区域性能赋给整个分区, 用鼠标指针框选整个部件, Abaqus 会把选择的区域高亮化, 单击提示区的 Done 按钮, 打开 Assign Section 对话框, 单击 OK 按钮, 部件颜色变绿说明部件已被赋予材料性能。

### 3. 组装部件

在 Module 下拉列表中选择 Assemble 选项, 进入 Assembly 模块, 由于此模型只有一个部件, 所以完成导入即可, 导入后的部件即作为一个实例出现在绘图区中。在菜单栏中选择 Instance→Create 命令, 或者在工具箱中单击  按钮, 打开 Create Instance 对话框, 选择 Plate 部件, 在 Instance Type 下选择 Independent (独立的), 即后续将在此实例上为其划分网格。设置完成后单击 OK 按钮, 即可导入完成的平板模型。

### 4. 定义分析步

1) 在 Module 下拉列表中选择 Step 选项, 进入 Step 模块, 在菜单栏中选择 Step→Create 命令, 或者在工具栏中单击  按钮, 打开 Create Step 对话框, 命名分析步为 Welding, 选择分析步类型为 Heat transfer (热传导分析), 单击 Continue 按钮。打开 Edit Step 对话框, 在 Description (描述) 文本框中输入“This is a welding step”, 接受默认的瞬态分析类型。在 Time period (时长) 文本框中输入此分析步的持续时间, 在本例中也就是焊接的时间, 可取焊道长度/焊接速度, 即  $200/(250/60)=48$  (s)。

2) 如图 4-9 所示, 在 Incrementation (增量步) 选项卡中输入相关数据, 单击 OK 按钮, 完成焊接分析步的创建。

其中, Maximum number of increments 默认值为 100, 而焊接过程一般均需要较多的增量步才能完成, 因此需要设为一个较大的数值(取 10000)。对于 Increment size 的设置, 由于焊接过程热量集中, 变量局部梯度较大, 因此需要设置为较小的增量步才能保证收敛。为此, Initial (初始增量步) 可设为 0.001s, Minimum (最小增量步) 可设为 1E-006s, Maximum (最大增量步) 可设为 0.2s。Max. allowable temperature change per increment (每增量步最大允许的温度变化) 要考虑不能允许模拟过程中温度变化过快, 过快的温度变化会造成误差, 并影响后续应力场计算时的精度和收敛性, 此处可设为材料从室温到熔点的温度跨度 (1500K)。其他保持默认设置, 单击 OK 按钮完成此焊接分析步的设定。

3) 采用相同的方法再创建一个散热分析步, 并命名为 Cooling。这个分析步需要长一点的时间, 以保证工件能够冷却到接近室温, 这里可设为 600s。由于散

热分析步温度变化没有焊接分析步那么剧烈，因此增量步的设置不用像焊接分析步那样严格，可参照图 4-10 进行设置。

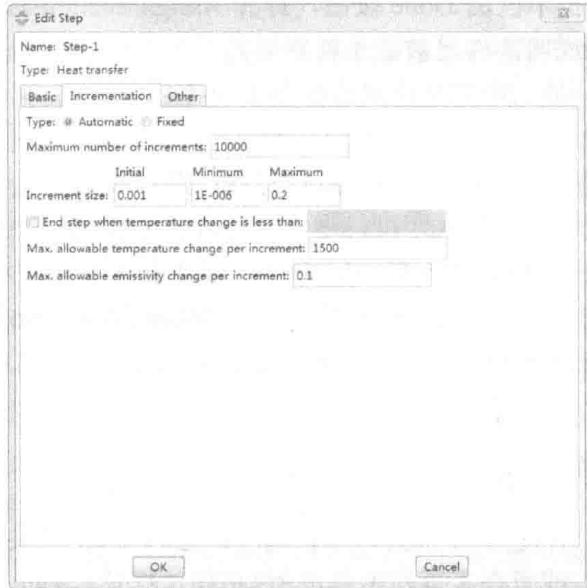


图 4-9 焊接分析步 Incrementation 选项卡的设置

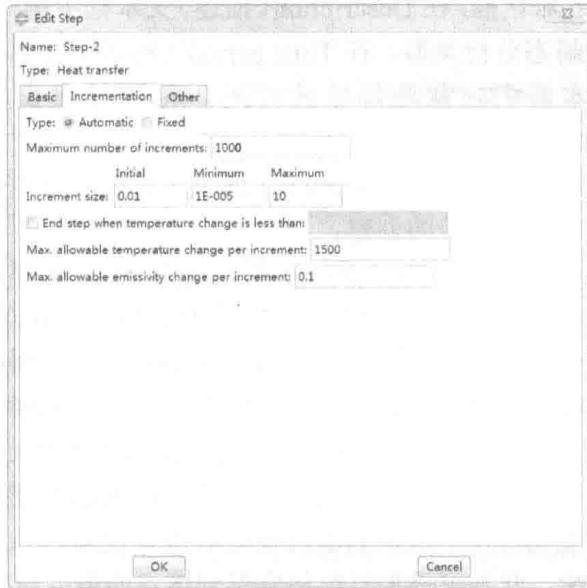


图 4-10 散热分析步 Incrementation 选项卡的设置

4) 接下来进行输出变量的设置，Abaqus 为每个计算设置了默认的输出，用户可根据自己的需要进行修改。为方便起见，在本例中只需要输出节点温度 (nodal



temperature, NT) 即可。在工具栏中单击  按钮, 打开 Load Manager (管理器) 对话框, 单击 Edit 按钮, 打开 Edit Field Output Request (编辑输出场变量) 对话框, 修改默认输出为 NT, 如图 4-11 所示, 完成后单击 OK 按钮。



图 4-11 场变量输出设置

## 5. 定义相互接触

1) 在 Module 下拉列表中选择 Interaction 选项, 进入 Interaction 模块, 定义相互接触。在本例中, 需要定义构件表面向外界的辐射值。

2) 在菜单栏中选择 Create→Interaction 命令, 或者在工具箱中单击  按钮, 打开 Create Interaction 对话框, 选择 Surface radiation 选项, 单击 Continue 按钮。

3) 在提示区选择辐射面, 在图形界面区选取构件所有外围表面作为辐射面, 并单击 Done 按钮, 打开 Edit Interaction 对话框。在 Emissivity 文本框中输入“0.7”作为平均发射率, 并将 Ambient temperature (环境温度) 设为 293, 如图 4-12 所示, 然后单击 OK 按钮完成设置。

4) 在计算表面辐射时, 需要设置绝对零度与 Stefan-Boltzmann 常数。在菜单栏中选择 Model→Edit Attributes→Model-1 (编辑模型属性) 命令, 打开 Edit Model Attributes 对话框, 勾选 Absolute zero temperature (绝对零度) 复选框, 并输入“0”; 勾选 Stefan-Boltzmann constant (Stefan-Boltzmann 常数) 复选框, 并输入“5.67E-011”, 如图 4-13 所示, 单击 OK 按钮完成设置。

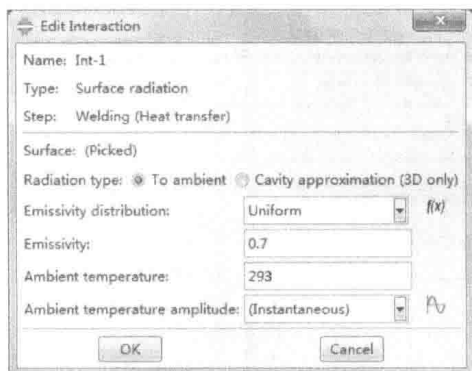


图 4-12 表面辐射设置

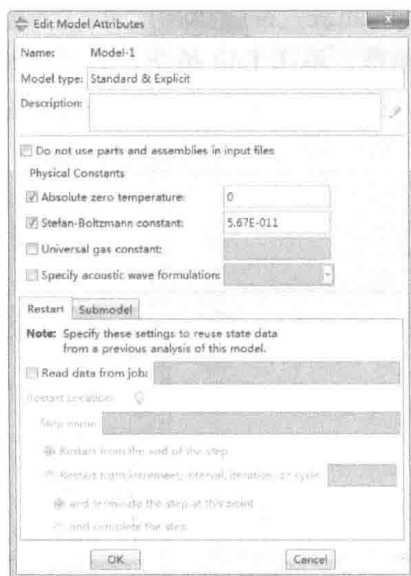





图 4-13 Stefan-Boltzmann 常数的设置

## 6. 定义载荷

1) 在 Module 下拉列表中选择 Load 选项，进入 Load 模块，施加载荷。

2) 在菜单栏中选择 Load→Create 命令，或者在工具箱中单击  按钮，打开 Create Load 对话框，为 Welding 分析步选择载荷类型为 Surface heat flux（表面热流输入，适用于平面热源；如果是体热源，如双椭球形热源，则应选择 Body heat flux），单击 Continue 按钮。

3) 在提示区选择热源施加区域。如果是平面热源，则选择模型的上表面；如果是体热源，则选择三维模型整体。单击 Done 按钮，打开 Edit Load 对话框，在 Distribution(分布)下拉列表中选择 User-defined(用户自定义热流分布)，Magnitude(幅值)文本框无须输入（由于热流幅值的大小会根据自定义子程序进行定义，因此此值并无实际意义）。焊接分析步载荷设置完成后，Abaqus 会默认载荷持续到后续的分析步，此时需移除散热分析步的热源载荷。在工具栏中单击  按钮，在打开的 Load Manager 对话框中单击 Cooling 下的 Propagated（延续），然后单击 Deactivated（移除）按钮，移除散热分析步的热源载荷，如图 4-14 所示。

4) 定义初始温度。因为选择 K 作为温度单位，此时如果不对初始温度进行设置，则程序会自动以 0K 作为初始温度进行计算。在菜单栏中选择 Predefined Field→Create（预定义场变量）命令，或者在工具箱中单击  按钮，打开 Create Predefined Field 对话框，依次选择分析步为 Initial，种类为 Other，类型为

Temperature, 然后单击 Continue 按钮。在提示区选择整个工件作为施加初始温度的区域, 并在随后打开的 Magnitude 对话框中输入“293”作为初始温度。完成后单击 OK 按钮退出初始场变量设置。



图 4-14 移除散热分析步的热源载荷

## 7. 划分网格

1) 在 Module 下拉列表中选择 Mesh 选项, 进入 Mesh 模块。在菜单栏中选择 Seed (种子) → Instance 命令, 或者在工具箱中单击 按钮, 打开 Global Seeds (全种子) 对话框, 在 Approximate global size 文本框中输入“2”作为整体网格尺寸, 然后单击 OK 按钮完成网格大小设置。

2) 在菜单栏中选择 Mesh → Instance 命令, 或者在工具箱中单击 按钮, 完成网格剖分。

3) 在工具箱中单击 按钮, 打开 Element Type 对话框, 选择单元类型为线性 8 节点热传导单元 DC3D8, 如图 4-15 所示, 然后单击 OK 按钮完成设置。

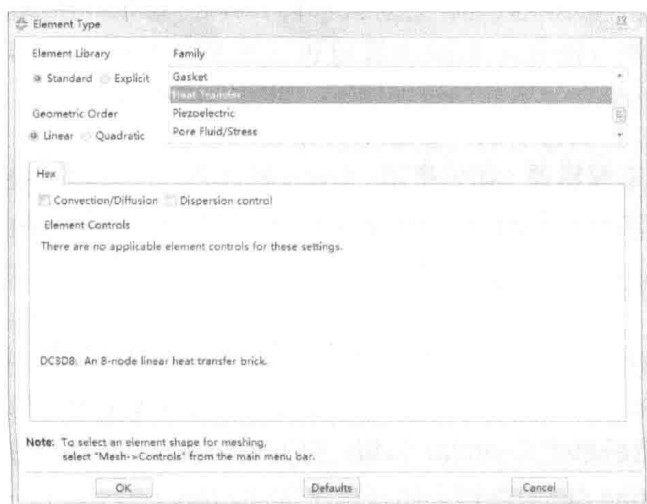


图 4-15 单元类型选择



### 8. 编写分布热流子程序 DFLUX

通过自定义子程序 DFLUX 写出热流密度  $q(r)$  与焊接时刻、空间位置之间的关系，即  $q$  与  $r$  之间的关系 [式 (4-2)]。通过式 (4-2) 可以看出， $r$  为高斯热源作用面上任意一点与热流中心之间的距离。设有效加热半径  $R_0 = 5\text{mm}$ ，则 DFLUX 子程序可按如下编写。

```

SUBROUTINE DFLUX (FLUX, SOL, KSTEP, KINC, TIME, NOEL, NPT,
1 COORDS, JLTY, TEMP, PRESS, SNAME)
C
C INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
C DIMENSION COORDS (3), FLUX (2), TIME (2)
C CHARACTER*80 SNAME
C
U=16.5
AI=60.
v=250./60.
yita=0.75
R0=5.

qm=yita*U*AI*1000./3.14/R0/R0

dx=v*time(1) —— 确定热流中心实时位置

rr=(COORDS(1)-dx)**2 + COORDS(2)**2 —— 平面上任意一点到热
流中心距离的平方

FLUX(1)=3.*qm*EXP(-3.*(rr/R0**2)) —— 最终热流形式


RETURN
END
    
```

程序接口，无须改动。  
读者可参考 *Abaqus User Subroutine Reference Manual*

已知参数赋值

打开任意文本编辑器（如记事本、Gvim 等），按照 FORTRAN 语言书写规范，输入上述程序，然后保存到 Abaqus 工作目录，并命名为 dflux.for。


### 9. 建立任务并提交计算

1) 在 Module 下拉列表中选择 Job 选项，进入 Job 模块，在菜单栏中选择 Job→Create 命令，或者在工具箱中单击  按钮，打开 Create Job 对话框，将其命名为 Thermal，然后单击 Continue 按钮，打开 Edit Job 对话框，在 General 任务页面的 User subroutine file 中指定上述子程序文件 dflux.for。

至此模型的前处理工作进行完毕，可从 Abaqus/CAE 菜单栏中选择 File→Save

as 命令保存此.cae 文件。

Abaqus 可以用两种方式对模型提交计算：一是以前台方式提交，其优点是可以比较直观地察看迭代过程、错误及警告信息等，但占用内存较大；二是以后台命令行方式提交，此种方法能比较灵活地应用命令行指令，也比较节省内存。

2) 以前台方式提交计算。在菜单栏中选择 Job→Manager 命令，或者在工具栏中单击  按钮，打开 Job Manager 对话框，单击 Write input（写输入文件）按钮可输出 .inp 文件 thermal.inp 到 Abaqus 工作目录，单击 Submit（提交）按钮可提交任务开始计算，单击 Monitor 按钮可观察分析的进程。分析结束后，单击 Results 按钮，对结果进行可视化。


3) 以后台命令行方式提交计算。在 Windows 操作系统中选择“开始”→“所有程序”→Abaqus xxx→Abaqus Command 命令，从命令行窗口进入工作目录，输入“abaqus job=thermal user=dflux int”提交计算。


计算完成后，在命令行窗口输入“abaqus viewer odb=thermal”查看可视化结果。


## 10. 可视化结果

在计算完成后，会在工作目录中产生一个 Thermal.odb 文件，即为结果数据库文件。可在 Abaqus/CAE 中打开该文件，方法如下。

1) 在 Module 下拉列表中选择 Visualization 选项，进入 Visualization 模块。在工具箱中单击  按钮，显示计算结果云图。

2) 在菜单栏中选择 Result→Field Output(场变量输出)命令，打开 Field Output 对话框，选择 NT11（即节点温度）可以显示温度场分布。单击工具栏中的  按钮，可以显示不同分析步、不同时刻的温度场结果。

3) 镜像对称操作。因为模型的整体对称关系，在计算时只计算了一半，可通过镜像对称功能完成镜像模型的结果显示。在工具箱中单击  按钮，打开 ODB Display Options（结果显示选项）对话框，单击 Mirror/Pattern（镜像/样式）选项卡，观察模型对称性，勾选  $xz$  平面作为镜像对称面，单击 OK 按钮完成设置。典型温度场结果如图 4-16 所示。

4) 绘制各点的温度历史曲线，在菜单栏中选择 Tools→XYData→Create 命令，或者在工具箱中单击  按钮，打开 Create XYData 对话框，勾选 ODB field output 单选按钮，即通过输出场变量来绘制  $xy$  曲线。然后单击 Continue 按钮，打开 XY Data from ODB Field Output 对话框（图 4-17），选择 Variables（变量）选项卡，在 Position（位置）下拉列表中选择 Unique Nodal（单个节点）。然后选取 NT11 为输

出变量。选择 Elements/Nodes 选项卡，单击 Edit Selection (编辑选择) 按钮，然后在图形界面区中按住 Shift 键，依次选取关心的节点，如图 4-18 所示，最后单击 Plot 按钮绘制  $xy$  曲线。

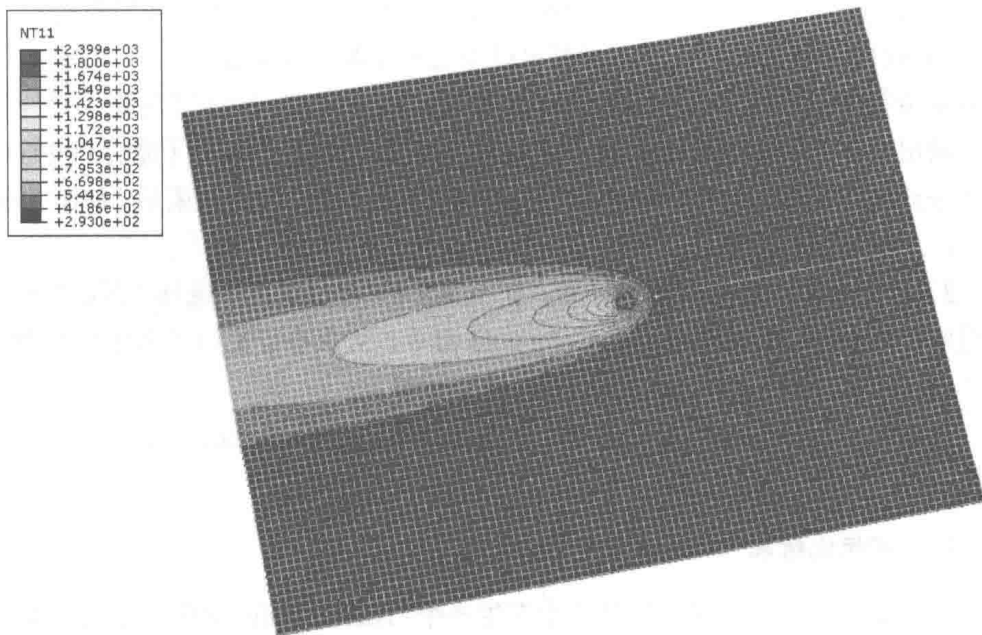


图 4-16 焊接过程中的温度场云图

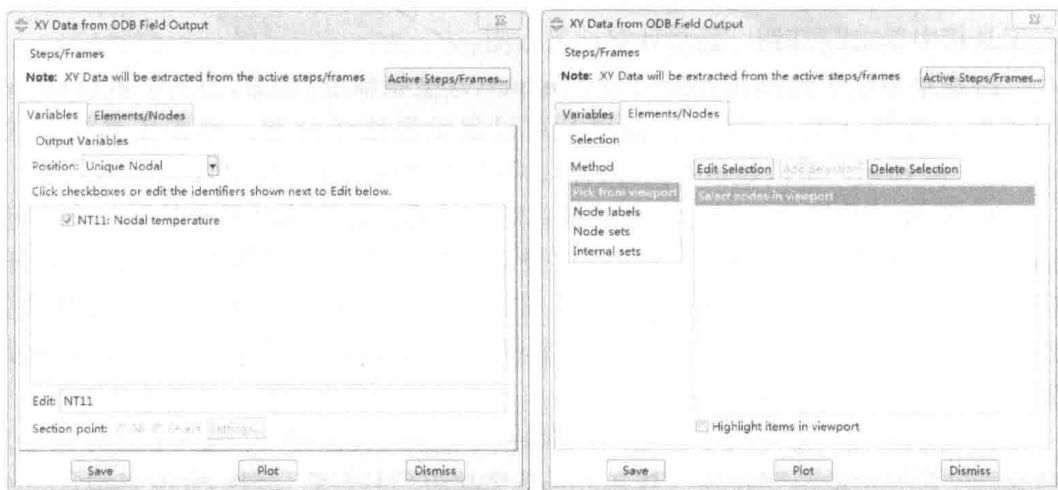


图 4-17 温度场  $xy$  曲线的绘制

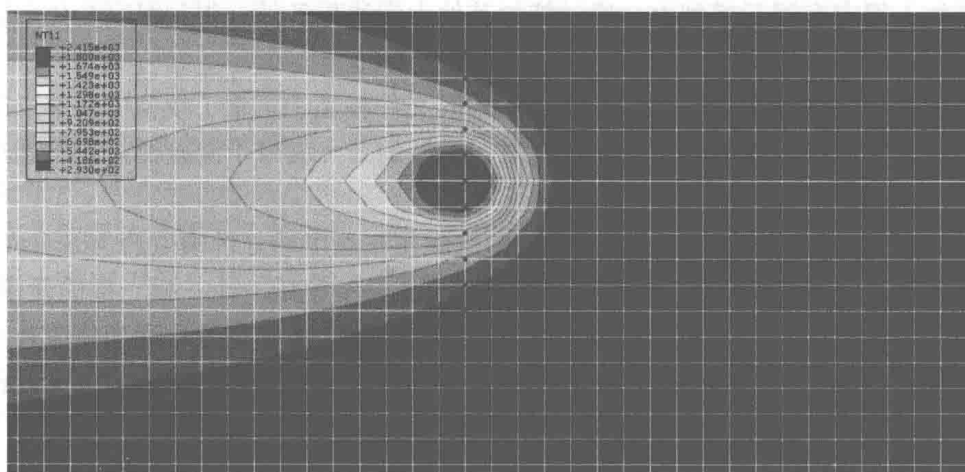


图 4-18 节点的定义

各点的温度历史曲线如图 4-19 所示。

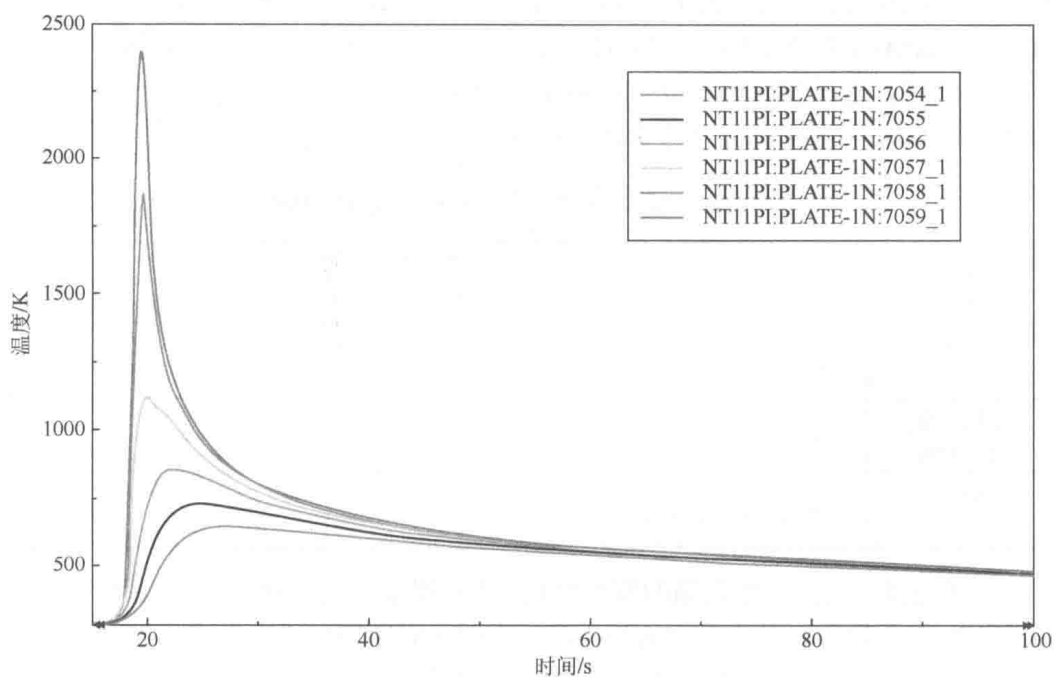


图 4-19 各点的温度历史曲线

#### 4.4.4 Abaqus/CAE 应力场模拟分析过程

采用间接耦合的方式计算焊接应力场，即利用前面温度场计算结果作为温度

载荷加入原有有限元模型中，通过施加其他力学边界条件，得到温度变化后模型的应力、应变及变形的分布。

由此可见，先前计算得到的 thermal.odb 文件相当于记录了模型中各节点的温度历史，因此在进行后续应力场分析时，模型的节点编号不能改变，也不能重新划分网格或增加新的节点。

为保证模型的一致性，一个简单的方法就是在温度场分析模型的 Abaqus/CAE 菜单栏内选择 Model→Copy Model（模型拷贝）命令生成一个一模一样的新模型，并重新命名，如命名为 Mechanical。下面需要对这个新模型进行适当修改补充，以适应应力场分析的要求。修改补充的内容包括增加材料力学属性、改变分析步类型、设定力学边界条件、改变单元类型等。

### 1. 增加材料力学属性

此部分内容主要是增加材料的弹性、塑性、热膨胀系数等材料力学属性，为进行应力场分析做准备。由于在 4.4.3 节的 2. 中已做了相关介绍，这里不再赘述。在 Edit Material 对话框中，选择 Mechanical→Elasticity（弹性）→Elastic 命令建立弹性性能，选择 Mechanical→Plasticity→Plastic（塑性）命令建立塑性性能，选择 Mechanical→Expansion（热膨胀）命令输入热膨胀系数，相关性能见表 4-2。

表 4-2 SUS301L-HT 不锈钢的机械性能参数

机械性能 参数	温度/K					
	293	473	673	873	1073	1273
弹性模量 /MPa	60527	66290	59093	55873	37473	20103
塑性/屈服 应力/MPa	821	771.7	529.3	529	296	60
热膨胀系数 /K <sup>-1</sup>	1.7E-5	1.73E-5	1.77E-5	1.82E-5	1.9E-5	2.E-5


值得注意的是，对于普通的钢铁材料，其物理熔点在 1800K 左右，而在 1100K 以上时，其承载能力基本上会大幅下降，也即达到所谓的“力学熔点”。在进行焊接模拟过程中，常将这部分高温弹塑性性能舍去，以减小计算过程中的材料非线性行为，达到提高计算效率的目的，同时高温弹塑性并不会对计算结果产生较大的影响。

另外，在塑性数据的输入过程中，不仅要输入相应温度的屈服应力（即塑性应变为 0 的应力），还要输入相应的“硬化”数据，包括屈服应力、塑性应变及相

应温度，相关设置如图 4-20 所示。

## 2. 改变分析步类型

将原有的热分析步删除，再建立两个通用分析步，一个分析步用于模拟构件在夹持状态下的焊接过程及冷却过程，另一个分析步用于模拟焊接完成后去除夹具夹持的过程。

在 Abaqus/CAE 中的操作过程如下：在 Module 下拉列表中选择 Step 选项，进入 Step 模块，在工具栏中单击  按钮，打开 Load Manager 对话框，删除原有的两个热分析步。

单击 Create 按钮，打开 Create Step 对话框，建立一个静力分析步，并命名为 Welding，选择分析步类型为 Static(静态)，General，如图 4-21 所示。然后单击 Continue 按钮，打开 Edit Step 对话框，对此分析步进行必要的设置，如图 4-22 所示。

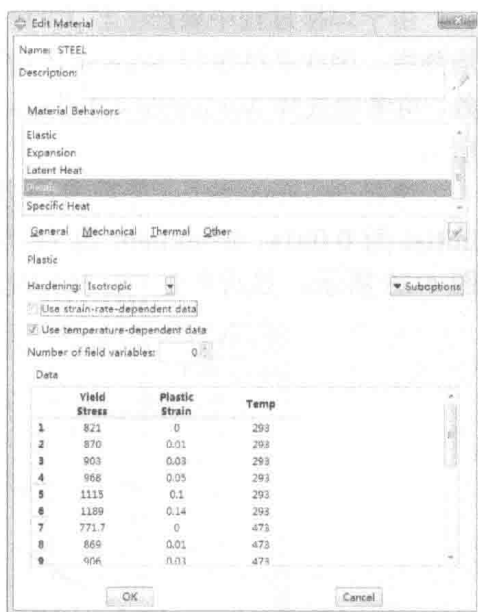


图 4-20 塑性性能的设置

### 注意：

此分析步的总时长应为原有焊接温度场分析中的焊接分析步时长与散热分析步时长的总和。在本例中应为  $48s+600s=648s$ 。



图 4-21 建立通用分析步



图 4-22 分析步设置


由于焊接过程中要产生较大的变形量，应力场分析的收敛难度要远大于温度场分析，因此必须选择 Nlgeom（几何非线性）为 On。如果还不能保证计算的收敛，可考虑选择 Automatic stabilization（自动稳定性）并设置相应参数，如图 4-22 所示。

选择 Incrementation 选项卡，设置 Maximum number of increments 为 10000，Initial 为 0.001s，Minimum 为 1E-6s，Maximum 为 10s，以保证计算效率，如图 4-23 所示，然后单击 OK 按钮完成分析步设置。



图 4-23 增量步设置

采用同样的方法，建立另一个静力分析步，用于模拟夹具移除过程，可命名为 Release，此分析步时长可设为 1s，并无实际物理意义，增量步设置同上。

下面设定应力场分析下的场变量输出，在工具栏中单击  按钮，打开 Load Manager 对话框，单击 Edit 按钮，打开 Edit Field Output Request 对话框，修改默认场变量输出为 LE、PE、S、U，即真应变、塑性应变、应力与节点位移这几个焊接应力分析中常用到的变量。为减小结果文件体积，还可将默认输出间隔 1 改为 20，如图 4-24 所示，完成后单击 OK 按钮退出场变量设置。


在工具栏中单击  按钮，打开 History Output Request Manager（历史变量输出管理）对话框，删除对历史变量的输出。



图 4-24 场变量输出设置

### 3. 设定力学边界条件

在进行焊接应力场模拟的过程中，要设定足够的约束才能保证模拟计算的顺利进行。在本例中，假定构件在焊接及随后冷却到室温的过程中，均处于夹具夹持状态，在 Abaqus/CAE 中边界条件设置过程如下。

在 Module 下拉列表中选择 Load 选项，进入 Load 模块，在工具箱中单击  按钮，打开 Create Boundary Condition 对话框，选择边界条件的创建步为 Welding，并选择约束类型为 Symmetry/Antisymmetry/Encastre（对称/反对称/固定），然后单击 Continue 按钮，如图 4-25 所示。

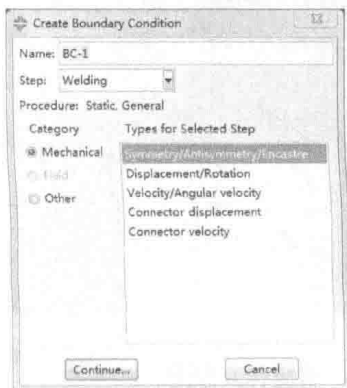


图 4-25 创建边界条件



采用相同的方法建立第二个对称约束边界条件。在图形界面区选择此边界条件要施加的区域，本例中在试板边缘处用鼠标指针选取部分节点，以模拟夹具夹持状态，通过单击 Done 按钮完成选定，并在随后打开的 Edit Boundary Condition 对话框内选择 ENCASTRE（全约束方式），完成第一个边界条件 BC-1 的设定。

由于本模型的对称性，只建立了一半平板模型，因此在对称面上要创建对称约束形式。由于所建立的模型是关于  $xz$  平面对称的，因此选择 YSYMM（ $y$  轴对称约束），完成第二个边界条件 BC-2 的设定。

最后，为保证在夹具移除时不发生刚体位移，需要在夹具移除步增加一个固定点的约束，可取焊缝底面中点，选择 ENCASTRE（全约束方式），完成第三个边界条件 BC-3 的设定。

其中，第一个边界条件的作用时域为焊接分析步，第二个边界条件的作用时域为所有计算过程，第三个边界条件的作用时域为夹具移除步，设置如图 4-26 所示。

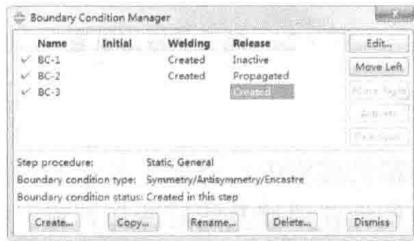


图 4-26 边界条件的创建

设置完成后的模型如图 4-27 所示。

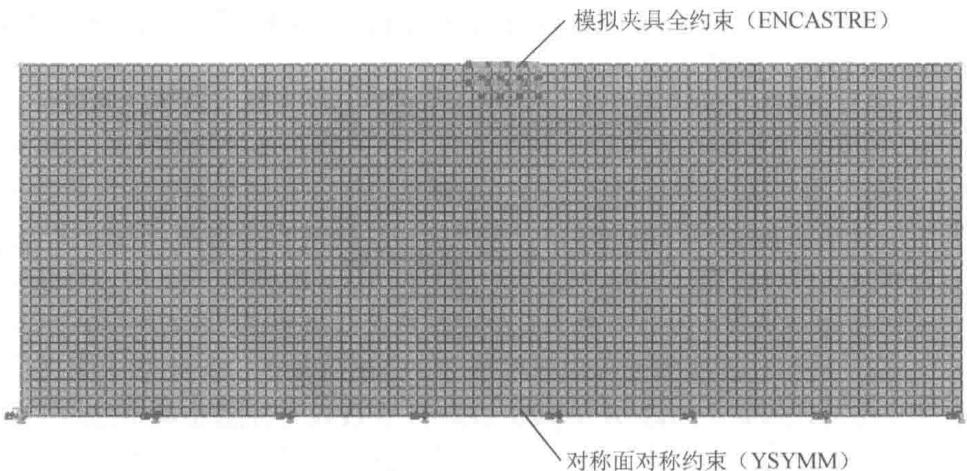



图 4-27 边界条件示意图

下面需要通过创建预定义场的方式引入温度历史，在工具栏中单击  按钮，在打开的 **Predefined Field Manager** 对话框中单击 **Edit** 按钮，对原有的关于初始温度的设定进行修改，如图 4-28 所示。

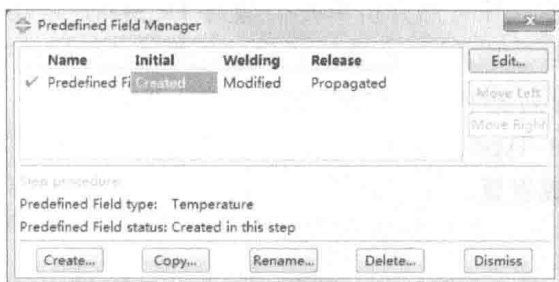

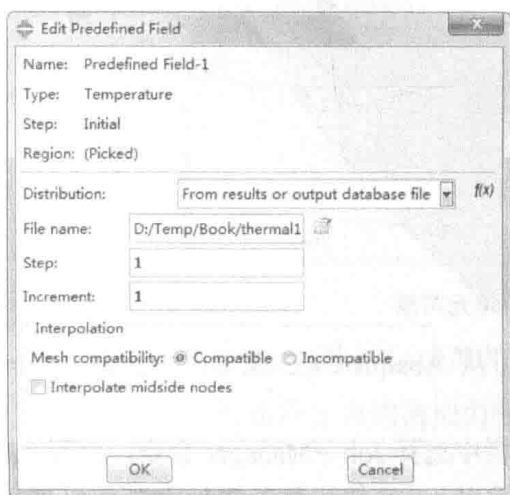
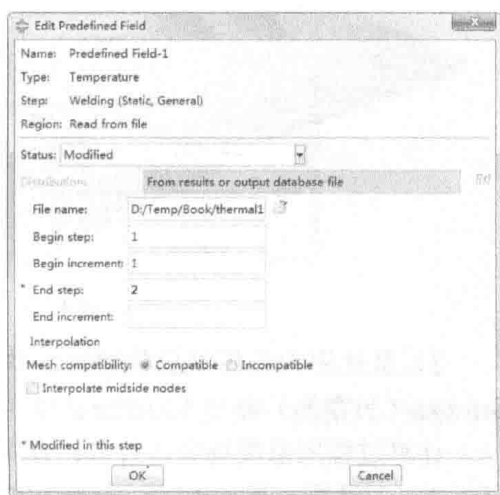


图 4-28 初始场设置

单击 **Edit** 按钮，打开 **Edit Predefined Field** 对话框，如图 4-29 所示。在 **Distribution** 下拉列表中选择 **From results or output database file** 选项，然后单击  按钮，选取热分析时的结果文件 **thermal.odb**。对于初始步，设置 **Begin Step**（起始分析步）为 1，**Begin Increment**（起始增量步）为 1，即从温度场结果文件中的第一分析步的第一增量步开始读入，单击 **OK** 按钮完成设置。对于焊接步，设置 **Begin step** 为 1，**Begin increment** 为 1，**End step**（结束分析步）为 2，即从温度场结果文件中的第一分析步的第一增量步开始读入，直到第二分析步的最后一个增量步，单击 **OK** 按钮完成设置。



(a) 初始步




(b) 焊接步

图 4-29 预定义场设置

#### 4. 改变单元类型

需要将原有的用于温度场分析的单元类型改为适用应力场分析的单元类型，并保持单元形状不变。原有热分析单元类型为 DC3D8，应相应修改为 C3D8R，以保证不出现剪切自锁现象。

在 Module 下拉列表中选择 Mesh 选项，进入 Mesh 模块，在工具箱中单击  按钮，打开 Element Type 对话框，更改单元类型为 C3D8R，如图 4-30 所示，然后单击 OK 按钮完成设置。

#### 5. 提交计算

1) 在 Module 下拉列表中选择 Job 选项，进入 Job 模块，在菜单栏中选择 Job→Create 命令，打开 Create Job 对话框，将其命名为 Mechanical。然后单击 Continue 按钮，打开 Edit Job 对话框，接受所有默认选择。

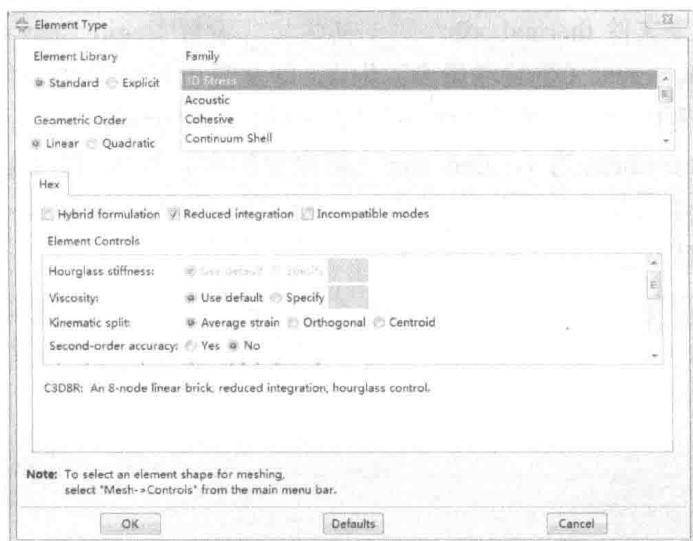


图 4-30 更改单元类型

2) 至此应力场模型已经建立完毕，可从 Abaqus/CAE 菜单栏中选择 File→Save as (另存为) 命令保存此.cae 文件。

计算过程同温度场分析过程：在菜单栏中选择 Job→Manager 命令，打开 Job Manager 对话框，单击 Write input 按钮可输出.inp 文件，单击 Submit 按钮可提交任务开始计算，单击 Monitor 按钮可观察分析的进程。

3) 分析结束后，单击 Results 按钮，对结果进行可视化。

也可通过命令行方式提交计算，如


```
abaqus job=mechanical int
```

### 提示：

上述为在 Abaqus/CAE 环境下进行焊接应力场分析的步骤，过程略显烦琐。一个更简单的办法是通过修改.inp 文件来完成应力场分析的建立与提交，但对.inp 文件的语法格式等有一定的了解。

## 6. 焊接应力场分析后处理

计算完成后，打开 Mechanical.odb 文件。

1) 在工具栏中单击  按钮，显示结构变形结果。

2) 在菜单栏中选择 Plot→Contours (绘制云图) 命令，显示云图，选择菜单栏中的 Result→Field Output 命令，选择 U (节点位移) 可以观察变形情况。在本例中，平板焊接完成后的变形主要体现在板材的厚度方向上，可选择 U3 进行观察，图 4-31 所示为变形放大 5 倍后的结果。

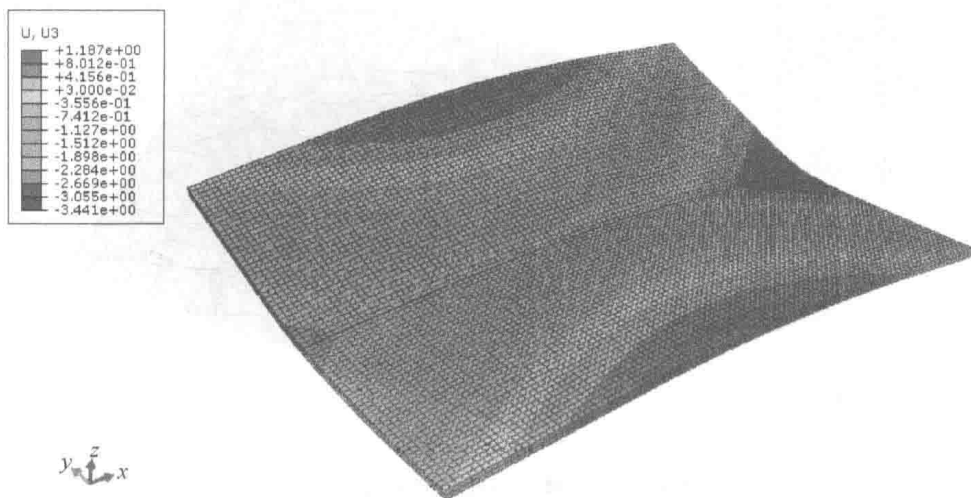


图 4-31 厚度方向变形图（放大 5 倍）

选择 S11，可显示  $x$  方向的应力分布，即纵向残余应力分布情况，如图 4-32 所示。

选择 S22，可显示  $y$  方向的应力分布，即横向残余应力分布情况，如图 4-33 所示。

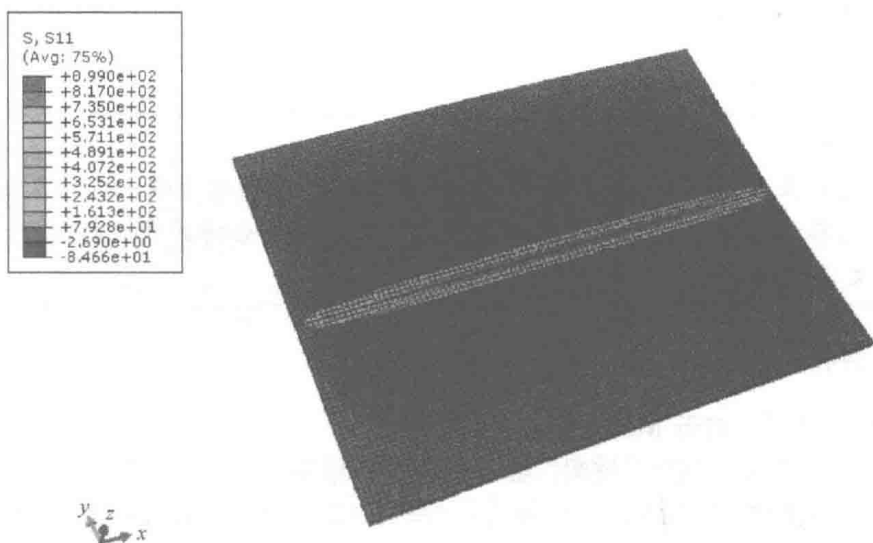


图 4-32 焊缝纵向残余应力分布云图

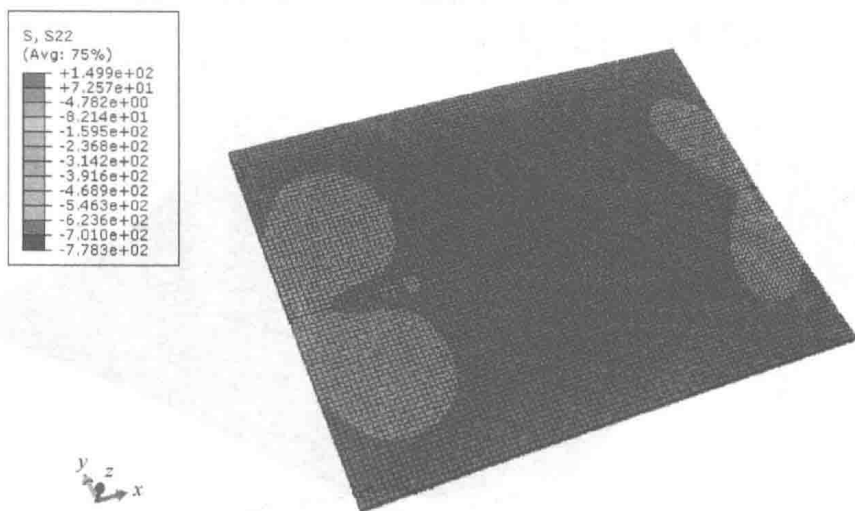


图 4-33 焊缝横向残余应力分布云图

同样地，可根据需要绘制纵向应力与横向应力的  $xy$  曲线图。在菜单栏中选择 **Tools**→**Path (路径)**→**Create** 命令，打开 **Create Path** 对话框，如图 4-34 所示，设置路径名称为 **Path-1**，勾选 **Node list** 单选按钮，然后单击 **Continue** 按钮。

在绘图区试板模型中部选择若干垂直于焊缝的节点组成路径 **Path-1**，如图 4-35 所示。



图 4-34 创建节点路径

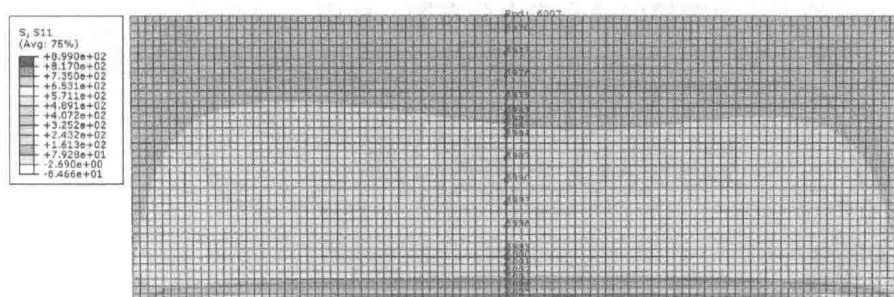



图 4-35 节点路径的选取

然后绘制纵向残余应力沿路径 Path-1 的曲线，在工具箱中单击  按钮，打开 Create XY Data 对话框，如图 4-36 所示。勾选 Path 单选按钮，打开 XY Data from Path 对话框，单击 Step/Frame（分析步/帧）按钮，仅激活 Release 步（最后一步）的最后一帧结果，并确保变量输出为 S11 应力，如图 4-37 所示。

单击 Plot 按钮，输出纵向残余应力分布图，如图 4-38 所示。

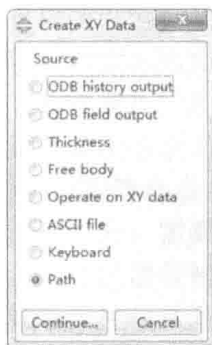


图 4-36 创建 xy 路径曲线

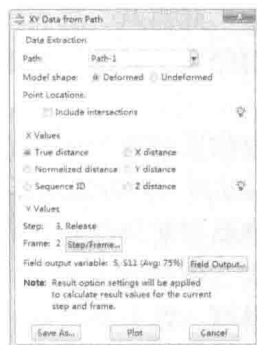


图 4-37 路径曲线设置

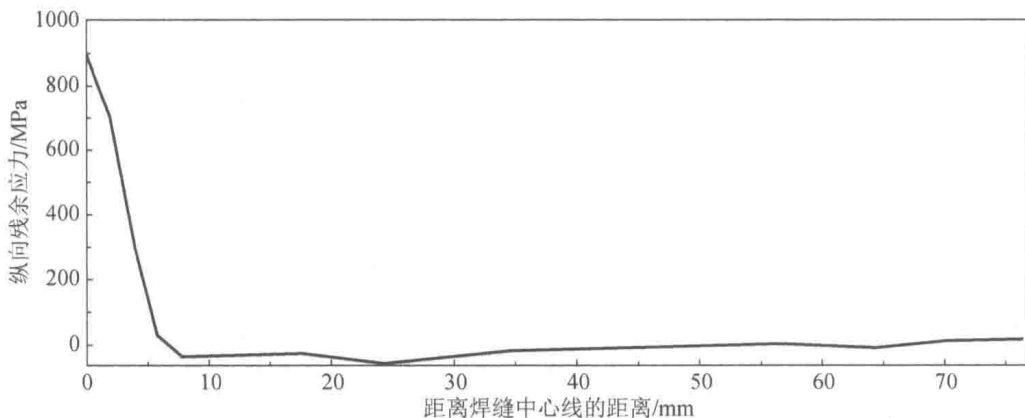


图 4-38 纵向残余应力分布图

用同样的方法绘制横向残余应力分布图，如图 4-39 所示。

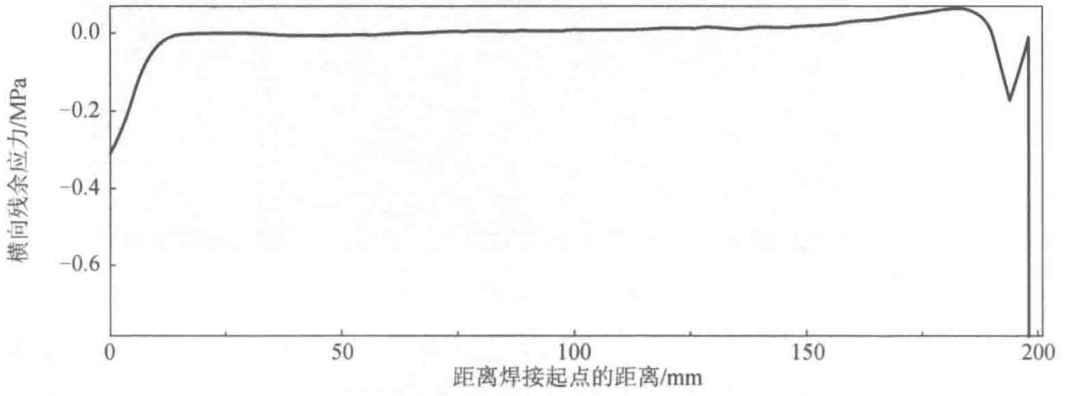


图 4-39 横向残余应力分布图

## 第 5 章

# 焊接热力模拟——固有应变法

预测大型复杂结构的焊接应力与变形必须解决运算时间和成本问题。焊接热弹塑性有限元法往往需要较长的计算时间和较高的计算成本，因而在用于预测大型复杂结构焊接变形时受到限制。固有应变法预测焊接变形是将焊缝及其附近所产生的固有应变作为初始应变进行一次弹性有限元计算，从而获得整个结构的焊接变形。它可以大大缩短运算时间和减少成本，并且能保证一定的精度，在实际焊接模拟过程中具有广阔的应用前景。

通过第 4 章的分析可以看到，焊接热弹塑性法具有计算结果准确、可以跟踪焊接热-力全过程等优点，但同时也存在计算效率不高的缺点。例如，在进行焊接热弹塑性法计算时，需要给定材料精确的从室温到高温的机械性能参数与热物理性能参数，焊缝区需要精细的网格划分，需要编写热源子程序等。为提高焊接模拟的计算效率，往往从几个方面着手进行改进：材料性能参数；网格划分算法；焊接热源模型等。

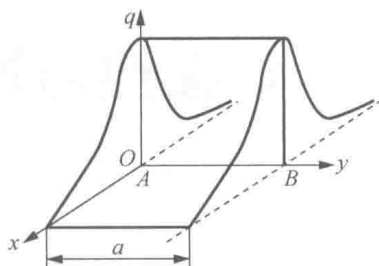
在材料性能参数方面，焊接模拟过程中的材料非线性是影响计算效率的主要因素之一，而材料的非线性主要来源于材料依赖于温度变化的力学性能，尤其是高温力学性能。前已述及，材料的高温力学性能，特别是超过材料本身“力学熔点”的弹塑性性能往往带来较大的非线性，但其又对模拟结果影响不大，因此，常采用摒弃高温力学属性的办法提高计算效率。

在网格划分算法方面，在保证精度的前提下减小网格数量也是提高计算效率的方法之一。常用的方法包括：①采用过渡化网格划分，即在焊缝及近缝区划分较细的网格，而在远离焊缝区域采用较粗的网格；②采用结构单元代替连续体单元；③采用自适应网格划分技术，即在计算过程中对于场变量梯度较大的位置，由程序自动地进行网格的重划，以兼顾计算精度与效率。

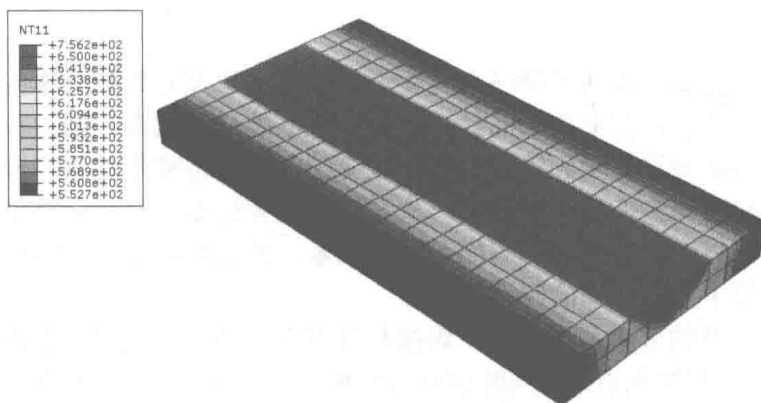
在焊接热源模型方面，采用串状热源或带状热源<sup>[41,42]</sup>，带状热源如图 5-1 所示。由图 5-1 (a) 可以看出，长度为  $a$  的带状热源热流  $q$  在垂直焊缝方向呈



高斯分布，而在焊缝方向上呈均匀分布，在保证总热量输入一致的前提下，对整段（或分段）焊缝同时进行加热，可以较大地提高计算效率。



(a) 带状热源分布示意图



(b) 带状热源作用下的焊接温度场

图 5-1 带状热源

上述方法虽然在一定程度上提高了焊接模拟的计算效率，但仍然属于热弹塑性法的范畴，对焊接计算效率提升的效果十分有限。本章介绍另一种焊接过程模拟方法——固有应变法，它避开了热弹塑性法的理论框架与计算流程，从而可以极大地提高焊接模拟的计算效率。

## 5.1 固有应变法的基本理论

### 5.1.1 固有应变的基本概念

焊接固有应变 (inherent strain) 最早是由日本学者 Yukio Ueda 等<sup>[43-45]</sup>提出，并将其应用于焊接模拟计算中的。与之联系密切的还有固有应力 (inherent stress)、固有变形 (inherent deformation) 和固有力 (inherent force) 等概念<sup>[46]</sup>，并且认为

固有应变是产生后三者的根源。固有应力是指物体在不受外力作用下内部所存在的自平衡的内应力，残余应力就是一种典型的固有应力。而固有应变指的是外载去除后仍残存在物体内部的应变。若将物体在外载作用下的总应变  $\varepsilon_{\text{total}}$  表示成弹性应变  $\varepsilon_e$ 、塑性应变  $\varepsilon_p$ 、热应变  $\varepsilon_T$ 、蠕变应变  $\varepsilon_c$  及相变应变  $\varepsilon_\theta$  的总和，即

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_T + \varepsilon_c + \varepsilon_\theta \quad (5-1)$$

则，在外载去除后，弹性应变得以恢复，而除弹性应变以外的应变统称为固有应变  $\varepsilon^*$ ，即

$$\varepsilon_{\text{total}} - \varepsilon_e = \varepsilon_p + \varepsilon_T + \varepsilon_c + \varepsilon_\theta = \varepsilon^* \quad (5-2)$$

固有应变的提出为解释焊接残余应力的产生提供了另外一种理论。

第2章借助三棒模型初步对焊接残余应力的产生原因进行了阐述，认为在焊接加热过程中焊缝和近缝区的金属受热膨胀，但受到周围较冷金属的约束，从而产生压缩塑性变形。而在随后的焊接冷却过程中，此部分金属冷却收缩受到周围金属的拘束而受拉，原来产生的压缩塑性应变会被拉伸抵消一部分，但仍会有部分压缩塑性应变残留下来，就是这部分压缩塑性应变引起了焊接残余应力和变形。这个理论称为残余塑性变形理论，可以说残余塑性变形理论对理解焊接应力与变形的产生原理和本质起到了重要的作用，但仍存在某些不够完善的地方。其一，在焊接过程中，焊缝金属会达到完全熔化状态，而这些有着自由表面的液体完全失去了承载的能力，因此也不会保留残余塑性应变。在随后的冷却过程中，液态焊缝金属冷却凝固受到拘束，只会产生热收缩应变并残存在工件中，从而引发焊接残余应力与变形。其二，焊接过后，工件中不只残留塑性应变，在某些金属材料中还会引发固态相变，进而引起相变应变等。而固有应变则将可能引起焊接残余应力的诸多应变，如热应变、塑性应变、相变应变和蠕变应变等都进行了统一。可以说，固有应变理论较之残余塑性变形理论有着更为宽泛的内涵，固有应变理论的提出，为分析和解释焊接残余应力与变形本质提供了更为精确的理论基础<sup>[47-51]</sup>。

### 5.1.2 固有应变法与热弹塑性法的关系

固有应变法与热弹塑性法之间特点鲜明、优势互补，共同组成当前焊接应力与变形模拟分析的两大类基本方法。热弹塑性法可以跟踪焊接热-力全过程，但计算成本较高、计算效率低下；而固有应变法计算量小、效率高，但只有焊接終了结果，且在精确度上不如热弹塑性法。在实际应用过程中，人们往往采用热弹塑性法进行焊接热-力过程详细的、科学的计算，而对于大型复杂焊接结构，则采用固有

应变法进行分析。基于两种方法的焊接过程有限元计算的详细对比如表 5-1 所示。

表 5-1 热弹塑性法与固有应变法的对比

对比项目	方法	
	热弹塑性法	固有应变法
原理	热弹塑性理论	固有应变理论
实施步骤	为保证收敛需划分较细的网格； 采用热源模型进行加载； 进行热-力耦合计算	可以划分较粗的网格； 加载焊接固有应变； 只需一次弹性计算
特点	跟踪焊接热-力全过程	没有中间过程，着重焊后应力与变形
计算花费	计算时间很长、计算量大	计算时间短、计算量小
适用范围	小型结构	大型复杂结构

### 5.1.3 固有应变法的解析计算

对于形状简单的焊接构件，如果知道其焊接固有应变值，则可应用解析法对焊接应力与变形进行计算。严格来讲，焊接固有应变与其他应变张量一样，在普通三维问题中应包括 9 个分量，根据剪应力互等原则，可表示为 6 个独立分量：

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \{\varepsilon_x^*, \varepsilon_y^*, \varepsilon_z^*, \varepsilon_{xy}^*, \varepsilon_{yz}^*, \varepsilon_{zx}^*\} \quad (5-3)$$

式中， $\varepsilon_x^*$ 、 $\varepsilon_y^*$ 、 $\varepsilon_z^*$ ——3 个坐标轴正应变；

$\varepsilon_{xy}^*$ 、 $\varepsilon_{yz}^*$ 、 $\varepsilon_{zx}^*$ ——3 个独立剪应变。

在实际应用过程中，常做一些简化。例如，取焊缝方向为  $x$  方向，垂直焊缝方向并处于焊接平面方向为  $y$  方向，板厚方向为  $z$  方向，则对于薄板焊接，引起焊接应力与变形的固有应变分量为纵向固有应变  $\varepsilon_x^*$  和横向固有应变  $\varepsilon_y^*$ ，而将其余分量做忽略处理。这样，可根据本构方程很容易地解出焊接固有应力（即残余应力）为

$$\sigma_x^* = \frac{E}{1-\gamma^2} (\varepsilon_x^* + \gamma \varepsilon_y^*) \quad (5-4)$$

$$\sigma_y^* = \frac{E}{1-\gamma^2} (\varepsilon_y^* + \gamma \varepsilon_x^*) \quad (5-5)$$

式中， $\sigma_x^*$ ——纵向固有应力；

$\sigma_y^*$ ——横向固有应力；

$E$ ——材料弹性模量；

$\gamma$ ——泊松比。

取板厚为  $h$ ，并对纵向固有应变及横向固有应变在焊缝截面上积分，可得纵向变形量与横向变形量分别为

$$\delta_x^* = \frac{1}{h} \int \varepsilon_x^* dydz \quad (5-6)$$

$$\delta_y^* = \frac{1}{h} \int \varepsilon_y^* dydz \quad (5-7)$$

纵向弯曲角与横向弯曲角分别为

$$\theta_x^* = \frac{1}{I} \int z \varepsilon_x^* dydz \quad (5-8)$$

$$\theta_y^* = \frac{1}{I} \int z \varepsilon_y^* dydz \quad (5-9)$$

式中， $I$  为惯性矩，且有

$$I = \frac{1}{12} \int z^2 dydz \quad (5-10)$$

进一步还可解出引起纵向收缩和横向收缩的纵向焊接固有力 and 横向焊接固有力为

$$F_x^* = E \int \varepsilon_x^* dydz = Eh\delta_x^* \quad (5-11)$$

$$F_y^* = E \int \varepsilon_y^* dydz = Eh\delta_y^* \quad (5-12)$$

引起纵向弯曲和横向弯曲的纵向弯矩和横向弯矩为

$$M_x^* = E \int z \varepsilon_x^* dydz = EI\theta_x^* \quad (5-13)$$

$$M_y^* = E \int z \varepsilon_y^* dydz = EI\theta_y^* \quad (5-14)$$

### 5.1.4 固有应变法的有限元计算

对于简单梁或平板结构的焊接应力与变形分析，尚可应用固有应变法的解析法进行计算。然而，对于较复杂的焊接结构，解析法将变得非常困难，甚至不可解。将固有应变法与有限元数值计算相结合，不但能够处理大型复杂结构，还可以快速、直观地对计算结果进行显示与评估。因具备优越性与灵活性，固有应变的有限元法在计算大型复杂构件的焊接应力与变形领域得到了快速的发展，并具有广阔的应用前景。

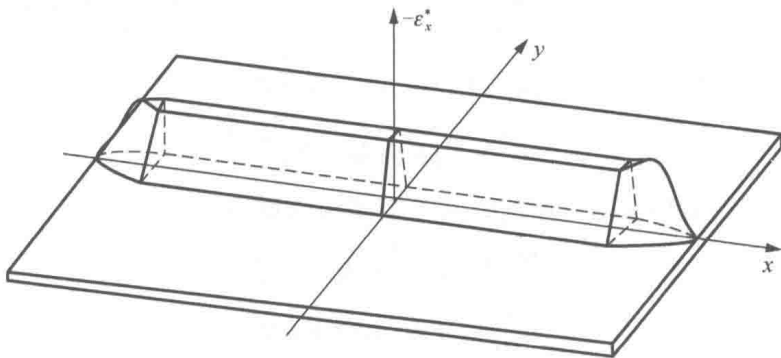
其计算思路是，在得到各方向上的焊接固有应变值后，将其作为单元的应变值加入焊缝及近缝区指定区域单元中，经过一次弹性有限元计算，快速得到整体构件的残余应力与焊后变形。抑或是根据固有应变值，通过式 (5-11) ~ 式 (5-14)

计算得到焊接固有力矩和弯矩，并将其施加于指定固有应变区域单元，也是通过一次弹性计算，得到整体结构的应力与变形分布。后一种方法为固有应变法的一个变种，又称为焊接固有力法。

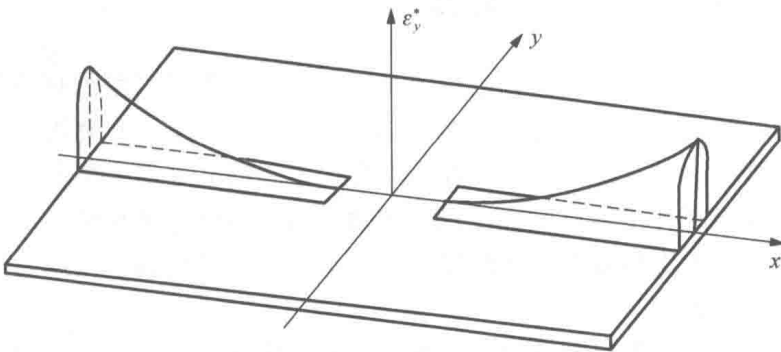
可见，固有应变有限元法与第 4 章讲到的热弹塑性有限元法相比，避免了大范围的非线性计算，计算时仅需要室温下的材料弹性属性，从而大幅度提高了焊接模拟的计算速度。

## 5.2 固有应变参数的确定

如前所述，无论是采用固有应变法的解析计算还是有限元计算，前提条件都是得到焊接固有应变的大小及分布。对于一个典型的平板对接结构，其纵向固有应变和横向固有应变的示意图如图 5-2 所示。



(a) 纵向固有应变



(b) 横向固有应变

图 5-2 平板对接焊固有应变示意图

由图 5-2 可见，焊接固有应变在区域内的分布并非是均匀的。为分析方便，引入“相对收缩体积”的概念，并定义焊接纵向相对收缩体积和横向相对收缩体积为

$$W_x = \int \varepsilon_x^* dA \quad (5-15)$$

$$W_y = \int \varepsilon_y^* dA \quad (5-16)$$

式中， $W_x$ ——纵向相对收缩体积；

$W_y$ ——横向相对收缩体积；

$A$ ——固有应变区域沿垂直焊缝方向的截面积。

虽然  $W_x$ 、 $W_y$  的名称为“体积”，但由于积分变量——固有应变值并没有单位，因此， $W_x$ 、 $W_y$  的单位仍为面积单位。

大量的研究表明，对于给定的待焊材料，在一定的焊接边界条件（如散热条件与工件尺寸等）下，相对收缩体积与焊接线能量存在如下比例对应关系：

$$W_x = KQ \quad (5-17)$$

$$W_y = \xi Q \quad (5-18)$$

式中， $K$ ——纵向固有应变系数；

$\xi$ ——横向固有应变系数；

$Q$ ——焊接线能量。

一般情况下，焊接线能量是已知的，为确定焊接固有应变值，首先应确定纵向固有应变系数  $K$  和横向固有应变系数  $\xi$ 。目前，确定应变系数主要有焊接变形实验法、简化条件下的解析法和热弹塑性有限元 3 种方法。

## 5.2.1 纵向固有应变系数的确定

下面首先通过简化条件下的解析法得到从极厚板纵向固有应变系数到薄板纵向固有应变系数  $K$  的取值范围。

### (1) 在极厚板上堆焊

在无限大极厚板上堆焊所产生的塑性应变与该点最高加热温度成正比。由焊接热过程理论知道，极厚板堆焊（高速移动点状热源）下的最高加热温度为

$$T_m(r) = T_0 + \frac{2Q}{\pi e c \rho r^2} \quad (5-19)$$

式中， $T_m(r)$ ——距焊缝中轴线  $r$  处的最高温度；

$T_0$ ——工件初始温度；

$e$ ——自然常数；

$c$ ——比热容；

- $\rho$ ——密度；
- $r$ ——点到焊缝中轴线的距离；
- $Q$ ——焊接线能量，按下式确定：

$$Q = \frac{0.24\eta UI}{v}$$

- 其中， $\eta$ ——电弧热效率；
- $U$ ——电弧电压；
- $I$ ——电弧电流；
- $v$ ——焊接速度。

对应的最大热应变由下式决定：

$$\varepsilon_m(r) = \alpha T_m = 0.368 \frac{\alpha Q}{c\rho \frac{\pi}{2} r^2} = 0.368 \frac{\alpha Q}{c\rho F_r} \quad (5-20)$$

- 式中， $\varepsilon_m(r)$ ——距焊缝轴线  $r$  处点的最大热应变；
- $F_r$ ——半径为  $r$  的半圆面积；
- $\alpha$ ——材料的热膨胀系数。

极厚板上纵向固有应变的分布如图 5-3 所示。

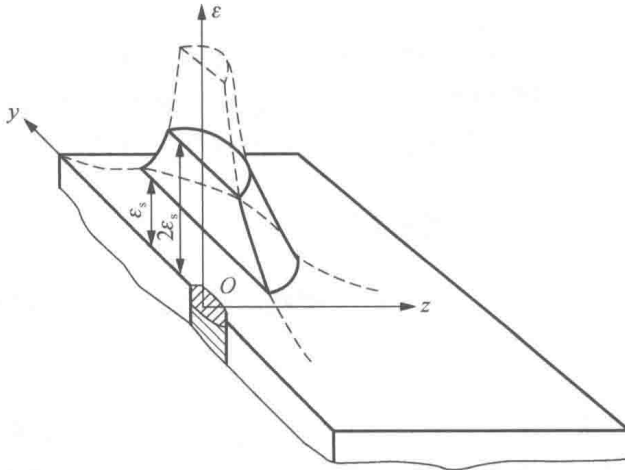


图 5-3 极厚板上纵向固有应变的分布

图 5-3 中， $\varepsilon_s = \sigma_s / E$ ，称为屈服应变。对于刚性极大的极厚板，实际变形可以忽略。于是，焊接时应变超过屈服应变  $\varepsilon_s$  的各点会产生压缩塑性应变，而应变超过 2 倍屈服应变的各点在冷却时将产生反向（拉伸）塑性应变。根据纵向相对收缩体积的定义，其等于由方程（5-20）确定的旋转体表面和平面  $\varepsilon_s$  及  $2\varepsilon_s$  所限

定的体积，即

$$W_x = \int_{\varepsilon_s}^{2\varepsilon_s} F_r d\varepsilon_m \quad (5-21)$$

把式 (5-20) 中的  $F_r$  代入式 (5-21) 并进行积分，得到

$$W_x = \int_{\varepsilon_s}^{2\varepsilon_s} 0.368 \frac{\alpha}{c\rho} \frac{Q}{\varepsilon_m} d\varepsilon_m = 0.368 \frac{\alpha}{c\rho} Q \ln 2 = 0.255 \frac{\alpha}{c\rho} Q \quad (5-22)$$

(2) 在薄板上堆焊

薄板焊接时可假定温度沿厚度方向是均匀的，此时最高温度分布（假定为高速移动线状热源）可近似表示为如下方程：

$$T_m(y) = T_0 + \frac{Q}{\sqrt{2\pi e c \rho h}} \quad (5-23)$$

式中， $T_m(y)$ ——距焊缝轴线  $y$  处点的最高温度；

$y$ ——点到焊缝轴线的距离；

$h$ ——板厚。

对应的最大热应变由下式决定：

$$\varepsilon_m(y) = 0.484 \frac{\alpha}{c\rho} \frac{Q}{2hy} \quad (5-24)$$

式中， $\varepsilon_m(y)$ ——距焊缝轴线  $y$  处点的最大热应变。

薄板上纵向固有应变的分布如图 5-4 所示。

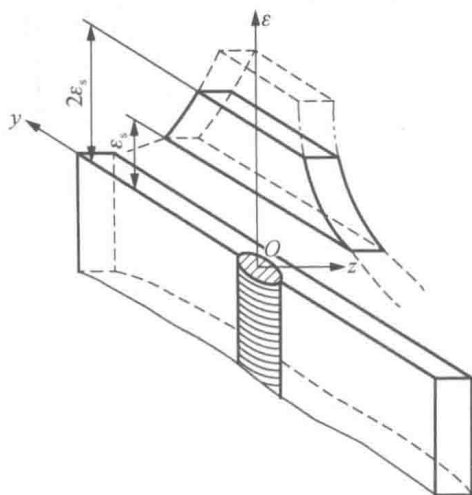


图 5-4 薄板上纵向固有应变的分布

同上，对于薄板焊接，纵向相对收缩体积  $W_x$  等于由方程 (5-24) 确定的平行曲线表面和平面  $\varepsilon_s$  及  $2\varepsilon_s$  所限定的体积，即



$$W_x = \int_{\varepsilon_s}^{2\varepsilon_s} 2hy d\varepsilon_m \quad (5-25)$$

把式(5-24)中的 $y$ 代入式(5-25)并进行积分,得到

$$W_x = \int_{\varepsilon_s}^{2\varepsilon_s} 0.484 \frac{\alpha}{c\rho} \frac{Q}{\varepsilon_m} d\varepsilon_m = 0.484 \frac{\alpha}{c\rho} Q \ln 2 = 0.335 \frac{\alpha}{c\rho} Q \quad (5-26)$$

由以上分析可知,纵向固有应变系数 $K$ 从薄板到极厚板的取值范围为

$$K = (0.255 \sim 0.335) \frac{\alpha}{c\rho} \quad (5-27)$$

由式(5-27)可以看出,对于同种材料,其纵向固有应变系数 $K$ 的变化幅度并不大。在实际应用中常做进一步简化,如对于普通低碳钢和低合金钢制作的刚性较大、中等焊接规范和自然冷却的实际板梁焊接结构,纵向固有应变系数 $K$ 建议采用下列数值:

$$K \approx 0.29 \frac{\alpha}{c\rho} \quad (5-28)$$

代入普通低碳钢的参数 $\alpha$ 、 $c$ 、 $\rho$ 后可得 $K = 8.6 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{J}$ 。可以发现,该数值与文献中介绍的大量板条边缘堆焊实验的结果完全一致。

上面通过简化条件下的解析计算给出了从极厚板到薄板状态下,纵向固有应变系数 $K$ 的范围。实际应用过程中,由于板厚的不同可以改变传热的条件,因此解析计算时的某些假设条件与实际相差较大,此时需要通过实验或热弹塑性有限元计算的方法进一步确定。文献[52]给出了低碳钢焊接纵向固有应变系数 $K$ 与板厚及焊接线能量的关系曲线,如图5-5所示。

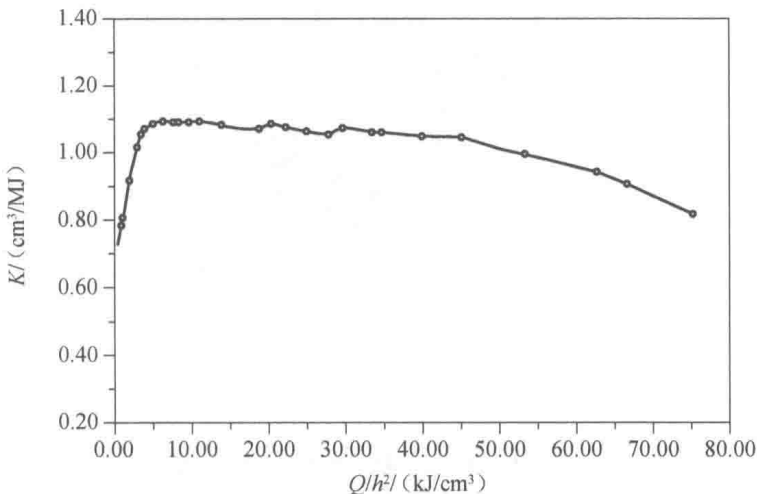


图 5-5 纵向固有应变系数 $K$ 与板厚及焊接线能量的关系曲线<sup>[52]</sup>

## 5.2.2 横向固有应变系数的确定

与分析纵向焊接固有应变类似，焊接过程中焊缝金属在横向也就是垂直于焊缝的方向上同样会发生膨胀与收缩受到约束，进而形成横向固有应变和变形。由简化的解析方法同样可以得到，从极厚板到薄板焊接横向固有应变系数 $\xi$ 的范围如下：

$$\xi = (0.255 \sim 1.0) \frac{\alpha}{c\rho} \quad (5-29)$$

可以看到横向固有应变系数 $\xi$ 的变化范围比纵向固有应变系数 $K$ 的变化范围要大，而且横向固有应变系数的影响因素也要比纵向多得多，如厚度的影响、约束的影响、焊接速度的影响、纵向塑性变形的影响、冷却的影响等。因此，除了极厚板和薄板可以应用上述公式外，其他情况下使用时一定要根据工件板厚和焊接条件进行具体分析，加以确定。

同样地，根据普通低碳钢和低合金钢制作的刚性较大、中等焊接规范和自然冷却的实际板梁焊接结构的大量实验数据，横向固有应变系数 $\xi$ 与板厚及焊接线能量的关系曲线如图5-6所示。

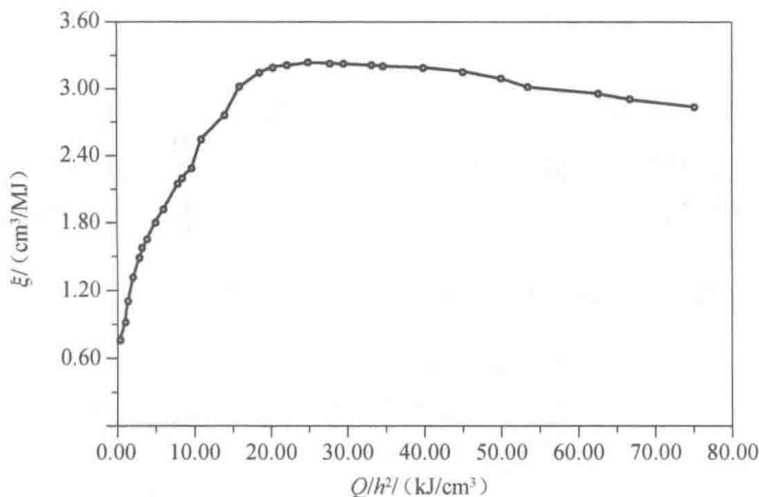


图 5-6 横向固有应变系数 $\xi$ 与板厚及焊接线能量的关系曲线<sup>[52]</sup>

## 5.3 固有应变的施加区域

按照焊接固有应变理论，固有应变的施加区域应为焊接过程中发生了固有应

变的区域。由图 5-2 可以看出，焊接固有应变分布在焊缝及邻近焊接一定距离内的区域中，而且并非是均匀分布的。在对残余应力计算精度要求不高的情况下，为了方便计算，可将固有应变的施加区域简化成包含焊缝及近缝区的一个截面为矩形的区域（其截面如图 5-7 所示），并将平均固有应变均匀地施加于这一区域。

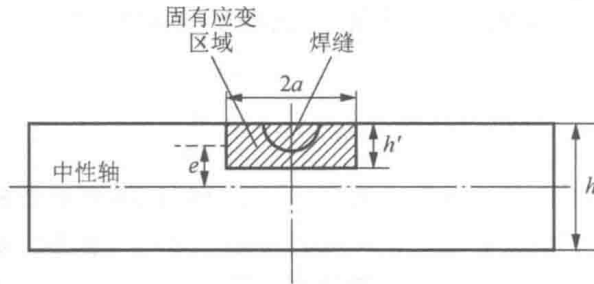


图 5-7 固有应变施加区域

$2a$ —固有应变区域的横向长度； $h$ —板厚； $h'$ —固有应变区域的深度； $e$ —偏心距

根据几何关系有

$$h' = h - 2e \quad (5-30)$$

假设固有应变在此矩形区域是平均分布的，则纵向固有应变与横向固有应变分别为

$$\varepsilon_x^* = W_x / (2a \times h') \quad (5-31)$$

$$\varepsilon_y^* = W_y / (2a \times h') \quad (5-32)$$

由此可见，对于一个矩形截面的固有应变区域，待定的形状参数仅有两个，即固有应变区域的横向长度  $2a$  和固有应变区域的深度  $h'$ ，对于不同的接头形式，其计算方法稍有不同。

在对接接头中，固有应变作用区域如图 5-8 所示。

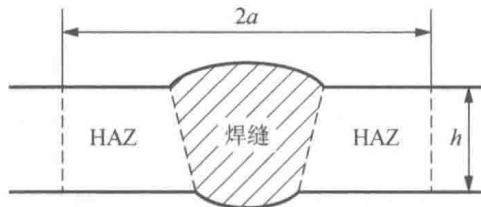


图 5-8 对接接头固有应变作用区域

理论上，固有应变区域的横向宽度  $2a$  应为焊接过程中发生了固有应变的区域宽度。在实际应用过程中，可近似简化为接头中焊缝加热影响区（HAZ）的宽度，厚度方向如果全部焊透，则可取整个板厚  $h$ ；如果属于部分熔透，则需按照式(5-30)

计算  $h'$ 。对于低碳钢，其偏心距  $e$  与焊接线能量及板厚的关系曲线如图 5-9 所示。

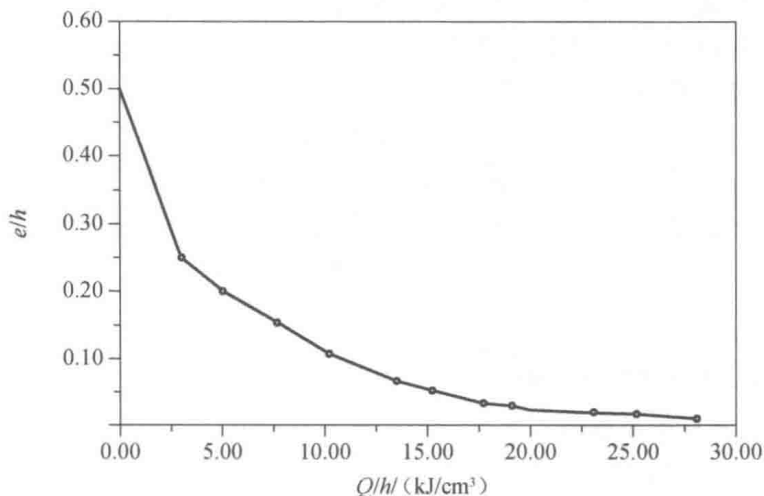


图 5-9 偏心距  $e$  与焊接线能量及板厚的关系曲线<sup>[52]</sup>

在角接头中，对于角接头固有应变的计算，需要分翼板与腹板两部分分别进行。固有应变作用区域如图 5-10 所示。

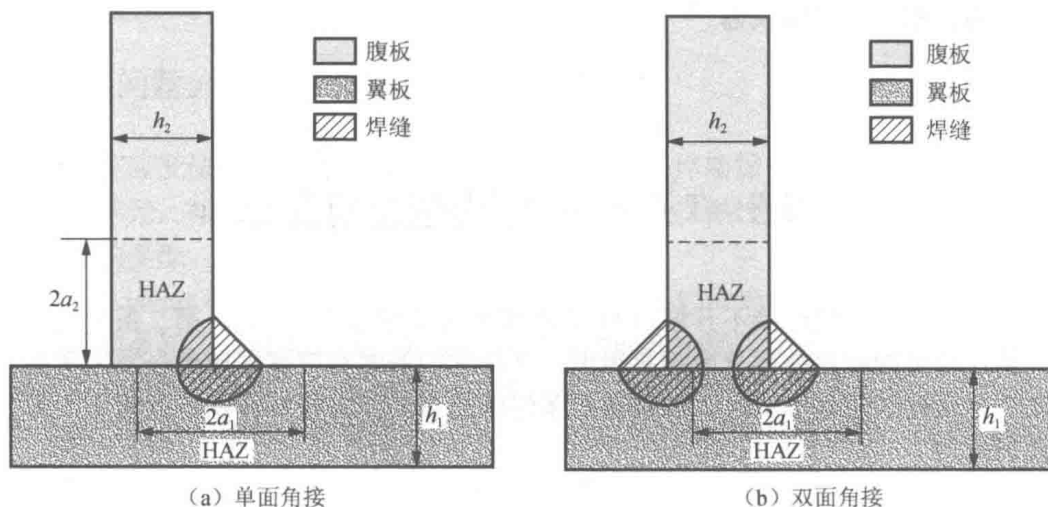


图 5-10 角接头固有应变作用区域

## 5.4 多道焊的固有应变

固有应变法常用于多道焊的计算，在多道焊过程中，因后一条焊道所产生的

固有应变总会对前一焊道产生影响，因此，总的焊接固有应变并非是各个焊道固有应变的简单累加，而要考虑焊道间的影响。

对于具有  $m$  个焊道的多道焊接头，常将其设想为仅有一个焊道的整体，而其总的纵向相对收缩体积按下式确定：

$$W_x = K_m W_{x\max} \quad (5-33)$$

式中， $W_{x\max}$ ——各焊道中具有最大线能量焊道的纵向固有应变；

$K_m$ ——多道焊系数，考虑其余焊道的影响系数， $K_m$ 可由下式确定：

$$K_m = 1 + 8 \frac{\varepsilon_s m}{\frac{\alpha}{c\rho} \theta} \quad (5-34)$$

其中， $\varepsilon_s$ ——材料的屈服应变；

$\alpha$ ——热膨胀系数；

$c$ ——比热容；

$\rho$ ——熔化金属的密度；

$\theta$ ——加热系数。

对于多道焊，横向固有应变的计算相对简单一些，其总的横向相对收缩体积等于各焊道横向相对收缩体积之和。例如，对于具有  $m$  个焊道的多道焊接头，其总的横向相对收缩体积为

$$W_y = \sum_{i=1}^m W_{yi} \quad (5-35)$$

## 5.5 T形接头的纵向固有应变

当两面用焊缝连接不开坡口的 T 形接头时 [图 5-10 (b)]，第二条焊缝与第一条焊缝可能有重叠部分或距离很近，这样它们的固有应变区域也会发生重叠。在计算这样的接头形式时，应对第二条焊缝的纵向相对收缩体积进行修正，用公式表示为

$$W_{x_2} = K_2 W_{x_1} \quad (5-36)$$

式中， $W_{x_1}$ ——第一道焊缝纵向收缩体积；

$K_2$ ——修正系数，且有

$$K_2 = \frac{\left[ (h_w + K_f) r_a + \frac{K_f^2}{2} \right] \varepsilon_s}{0.29 \frac{\alpha}{c\rho} Q} \quad (5-37)$$

式中,  $h_w$ ——腹板厚度;

$K_f$ ——焊脚高度;

$r_a$ ——塑性应变区深度,按下式确定:

$$r_a = 0.41 \sqrt{\frac{\alpha Q}{c\rho \varepsilon_s}} \quad (5-38)$$

或者取  $r_a = h_f$  (翼板厚度), 由两者中较小的一个来确定。而且, 对于大多数梁架型结构, 可取  $K_2 = 0.10 \sim 0.20$ 。

## 5.6 固有应变法平板堆焊综合实例

### 5.6.1 问题描述

船用 D32 钢板 (200mm×200mm×21mm), 采用 SH507  $\phi$ 4mm 焊条沿正面中心线进行手工表面堆焊。采用固有应变法对焊后变形进行计算。

材料参数: 弹性模量 210000MPa, 屈服极限 320MPa。焊接参数: 焊接电流 170A, 电压 25V, 焊接速度 0.25cm/s, 电弧热效率 0.7。

### 5.6.2 问题分析

固有应变法的有限元计算实质是将计算得到的焊接固有应变值施加于焊缝及其邻近单元, 即固有应变区域单元中, 然后进行一次弹性计算得到残余应力及焊后构件的变形。

在 Abaqus 等有限元软件中, 由于固有应变值不能作为载荷直接施加到焊缝及其附近的单元, 一般采用初始应变法或降温法间接实现。初始应变法是指将焊接固有应变值作为计算的一个初始状态赋予接头相应区域中, 并且在随后的计算中产生相应收缩, 达到产生焊接应力与变形的目的。此方法略显烦琐, 尤其是在焊缝比较多的情况下。降温法的思路是利用软件提供的设置材料各向异性热膨胀系数的功能, 使相应单元在一个虚拟的降温过程中在纵向和横向产生相应的收缩效应, 进而间接产生焊接应力与变形。

下面通过降温法来实现问题的求解。

首先, 根据给定的焊接参数, 利用固有应变公式计算板材焊接的横向固有应变、纵向固有应变及焊透深度, 然后将固有应变设为相应方向的热膨胀系数, 最后施加负的单位温度载荷, 来施加固有应变。

$$\varepsilon = W / F = \alpha \cdot \Delta T \quad (5-39)$$

式中,  $W$  ——单位长度上的焊缝总收缩量;

$F$  ——施加固有应变的单元的截面积;

$\alpha$  ——热膨胀系数, 在此处等于固有应变数值的大小;

$T$  ——单位温度载荷。

可见, 如果设  $\Delta T = -1$ , 则在此给定的单位温度载荷下, 产生的应变即为相应的热膨胀系数数值。

**提示:**

1) 焊缝的纵向应变和横向应变对应的热膨胀系数应根据焊接方向做相应设置。

2) 不存在固有应变的其他方向和其他单元的热膨胀系数应取零。

根据固有应变理论, 焊接横向固有应变和纵向固有应变的计算流程如图 5-11 所示。

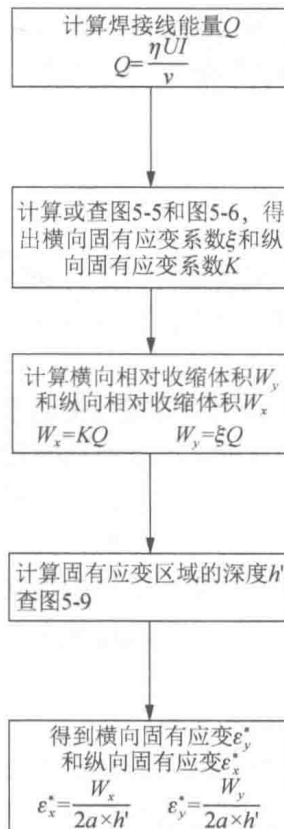


图 5-11 固有应变的计算流程图

### 5.6.3 Abaqus/CAE 分析过程

在建模以前要先确定固有应变加载区域 ( $2a \times h'$ )，以及纵向固有应变和横向固有应变 ( $\varepsilon_x^*$ 、 $\varepsilon_y^*$ )，为后续计算提供数据。

#### 1. 计算相关参数

计算焊接线能量： $Q = \frac{\eta UI}{v} = 1190 \text{ J/mm}$ 。

根据板厚  $h$ ，查图 5-5 得纵向固有应变系数  $K = 8.6 \text{ E-4 mm}^3/\text{J}$ 。

查图 5-6 得横向固有应变系数  $\xi = 9.7 \text{ E-4 mm}^3/\text{J}$ 。

查图 5-9 得偏心距  $e = 6.1 \text{ mm}$ ，再由  $h' = h - 2e$  得  $h' = 8.8 \text{ mm}$ 。

根据  $W_x = KQ$ ，得纵向固有应变体积  $W_x \approx 1.0234 \text{ mm}^2$ 。

根据  $W_y = \xi Q$ ，得横向固有应变体积  $W_y \approx 1.1543 \text{ mm}^2$ 。

根据经验，取固有应变区域宽度  $2a = 30 \text{ mm}$ 。

根据  $\varepsilon_x^* = \frac{W_x}{2a \times h'}$ ，得纵向固有应变  $\varepsilon_x^* \approx 0.00388$ 。

根据  $\varepsilon_y^* = \frac{W_y}{2a \times h'}$ ，得横向固有应变  $\varepsilon_y^* \approx 0.00437$ 。

#### 2. 创建并剖分几何体


1) 启动 Abaqus/CAE，在打开的 Start Session 对话框中选择 Create Model Database → With Standard/Explicit Model 选项，启动通用分析模块。

2) 在 Module 下拉列表中选择 Part 选项，进入 Part 模块。

3) 在菜单栏中选择 Part → Create 命令，或者在工具箱中单击  按钮，打开 Create Part 对话框。

4) 将部件命名为 Plate，选择三维、可变形体和通过截面拉伸获得三维实体模型。



5) 在 Approximate size 文本框中输入“800”，单击 Continue 按钮，出现草图绘制界面，并显示栅格。

6) 在工具栏中单击  按钮，在提示区出现提示后，分别输入 (0,0) 和 (200,200) 作为矩形截面的两个对角点，此为三维体的二维矩形截面（即上表面），然后单击鼠标中键完成一个  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  的二维矩形截面的绘制。

7) 在提示区单击 OK 按钮，打开 Edit Basic Extrusion 对话框。在对话框中输



入“21”作为 Depth 的数值，即三维模型的厚度为 21mm，单击 OK 按钮生成平板三维的部件。

8) 在工具箱中单击  按钮，然后在图形界面区单击平板模型的一个侧面，并选取一条边作为 Vertical and the right (竖直并且在右边)，Abaqus/CAE 会自动将此平面旋转至屏幕中心。单击  按钮，画出固有应变的矩形区域 (30mm × 8.8mm)，如图 5-12 所示。

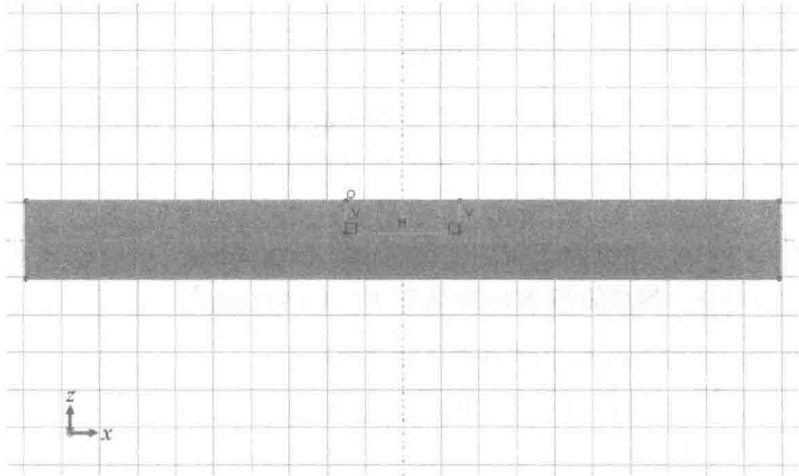



图 5-12 矩形区域的剖分

9) 再将此剖分面延伸到体，单击  按钮，然后选取剖分面上的 3 条剖分线作为剖分边，选取平板纵向的一条边作为剖分方向，剖分实体，如图 5-13 所示。

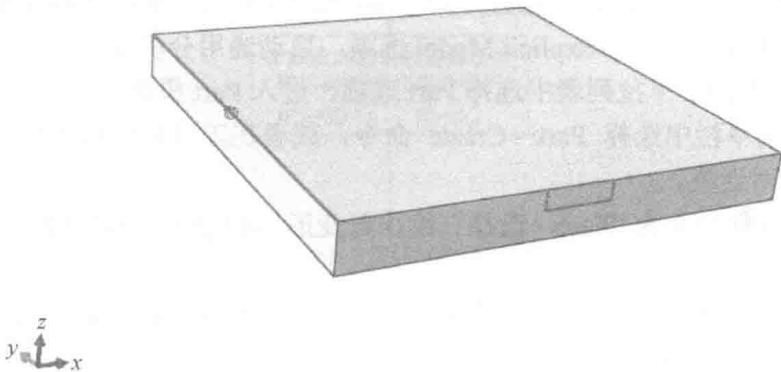


图 5-13 三维实体的剖分

剖分完成后的三维实体如图 5-14 所示，这样就将固有应变区域分割出来了。

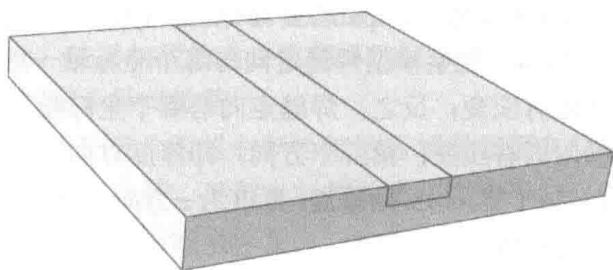



图 5-14 剖分固有应变区域

### 3. 创建各向异性材料属性

1) 在 Module 下拉列表中选择 Property 选项, 进入 Property 模块, 在菜单栏中选择 Material→Create 命令, 或者在工具箱中单击  按钮, 打开 Edit Material 对话框, 将材料命名为 D32。

2) 在 Edit Material 对话框中设置材料的机械性能, 选择 Mechanical→Elasticity→Elastic 命令建立弹性性能, 设置弹性模量为 210000, 泊松比为 0.3; 选择 Mechanical→Plasticity→Plastic 命令建立塑性性能, 设置真实应力为 320, 塑性应变为 0.0, 即初始屈服应力为 320MPa。

3) 右击模型树中刚建立的材料 D32, 复制并改名为 weld, 为设定焊缝固有应变做准备, 如图 5-15 所示。

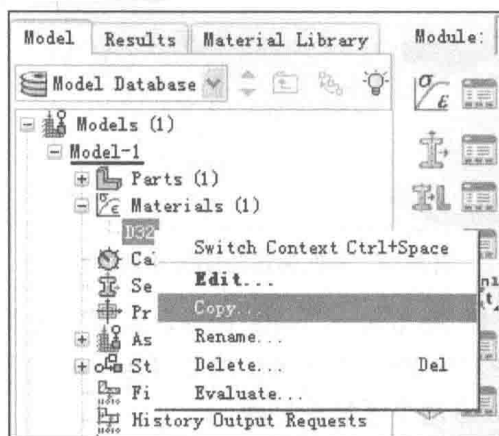


图 5-15 复制材料属性

4) 在模型树中双击刚创建的 weld 材料, 增加各向异性热膨胀系数作为其固

有应变值。选择 Mechanical→Expansion 命令，在 type 下拉列表中选择 Orthotropic（正交各相异性）选项，观察模型焊缝走向与哪个坐标轴一致，则此方向为焊缝纵向，应输入纵向固有应变；反之，焊缝走向与哪个坐标轴垂直，则此方向为焊缝横向，应输入横向固有应变；第三个方向，即厚度方向，固有应变为零。在本例中，焊缝走向与 y 轴平行，与 x 轴垂直，厚度为 z 方向，输入的固有应变值如图 5-16 所示，最后单击 OK 按钮完成设置。

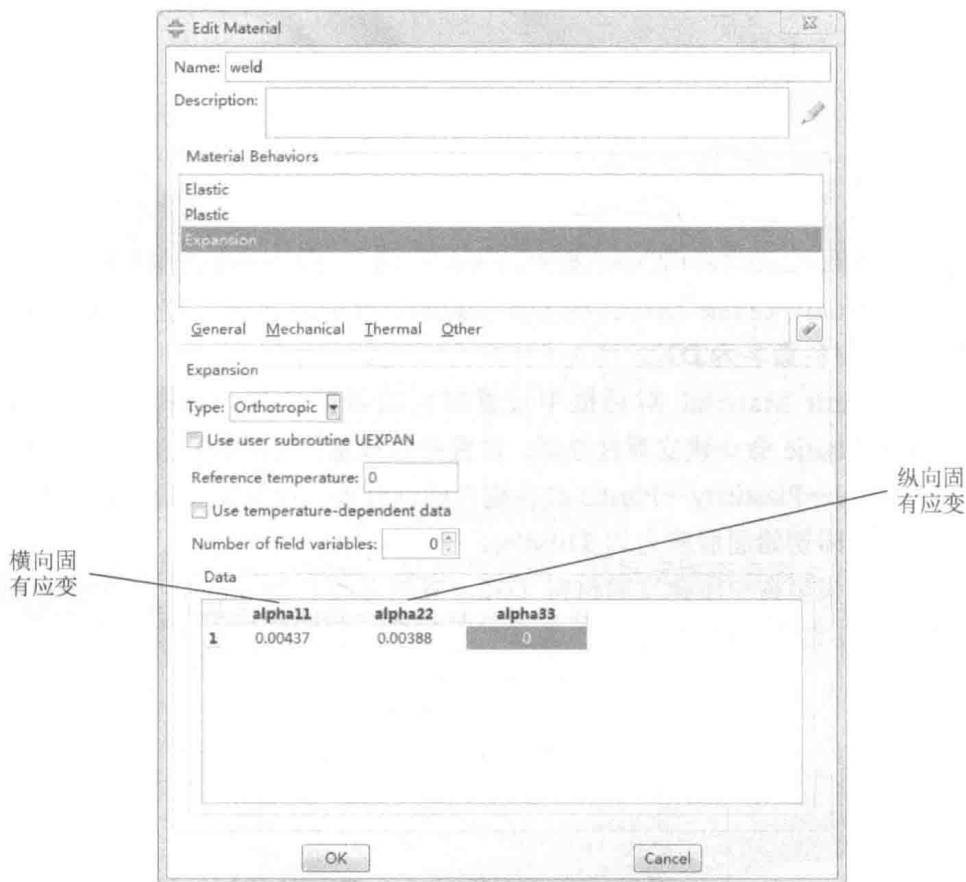



图 5-16 各向异性热膨胀系数的设定


5) 在菜单栏中选择 Section→Create 命令，或者在工具箱中单击 按钮创建两个区域属性，分别命名为 Base 和 weld，并分别选取 D32 和 weld 作为区域材料，最后单击 OK 按钮完成这两个区域的创建。

6) 在菜单栏中选择 Assign→Section 命令，或者在工具箱中单击 按钮，即将建立的两个区域的性能赋给相应区域，用鼠标指针框选焊缝以外部分，选择的区域将会高亮化，单击 Done 按钮完成区域选择。然后在打开的 Edit Section

Assignment 对话框中的 Section 下拉列表中选择 Base 截面属性, 并单击 OK 按钮, 赋予此区域 Base 属性。使用相同的方法选择焊缝区域并赋予其 weld 属性, 部件颜色变绿说明部件已被赋予材料性能。

7) Abaqus 规定, 采用各向异性材料性能的区域必须要有局部坐标, 因此需要建立一个关于焊缝的局部坐标。局部坐标的种类依焊缝形状而定, 在本例中, 焊缝为平直走向, 应建立矩形局部坐标系。

在工具箱中单击  按钮, 通过 3 点建立局部坐标, 保持坐标轴类型为 Rectangular (矩形)。然后单击 Continue 按钮, 这时需要按提示选择 3 点以完成坐标轴设置。在本例中, 此局部坐标与整体坐标重合即可, 可保持默认设置, 单击 Create Datum (创建基准) 按钮创建局部坐标系即可。

8) 在工具箱中单击  按钮设置材料方向, 在视图区选取焊缝区域并单击 Done 按钮。然后选择适用的局部坐标, 这时需要在提示区选择 Datum CSYS List (基准坐标系列表), 并选择刚刚建立的局部坐标, 其他保持默认设置, 如图 5-17 所示。

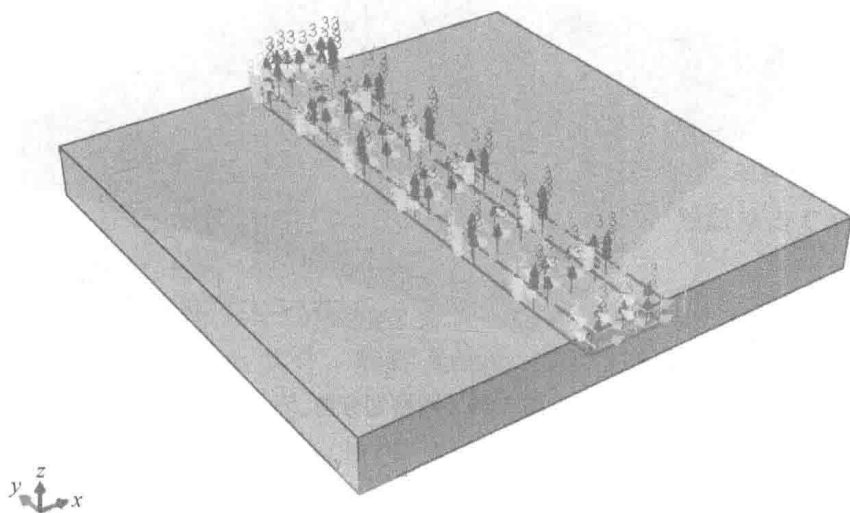




图 5-17 设定各向异性材料方向

#### 4. 组装部件

在 Module 下拉列表中选择 Assembly 选项, 进入 Assembly 模块, 由于模型只有一个部件, 所以完成导入即可。在菜单栏中选择 Instance→Create 命令, 或者在工具栏中单击  按钮, 打开 Create Instance 对话框, 选择 Plate 部件, 单击 Apply 按钮, 即可导入完成的平板模型。

## 5. 定义分析步

在固有应变法分析中，得不到焊接中间结果，所以并没有焊接时间的概念。在 Module 下拉列表中选择 Step 选项，进入 Step 模块。在菜单栏中选择 Step→Create 命令，或者在工具栏中单击  按钮，打开 Create Step 对话框，命名分析步为 Welding，选择分析步类型为 Static, general。然后单击 Continue 按钮，打开 Edit Step 对话框，在 Time period 文本框中设置持续时间为 1s，其他保持默认设置即可。

## 6. 划分网格

应用固有应变法预测焊接变形的优势之一就是无须很细的网格划分，在本例中，网格尺寸取 5mm。网格类型选 8 节点缩减积分三维连续单元 C3D8R。划分的网格如图 5-18 所示。

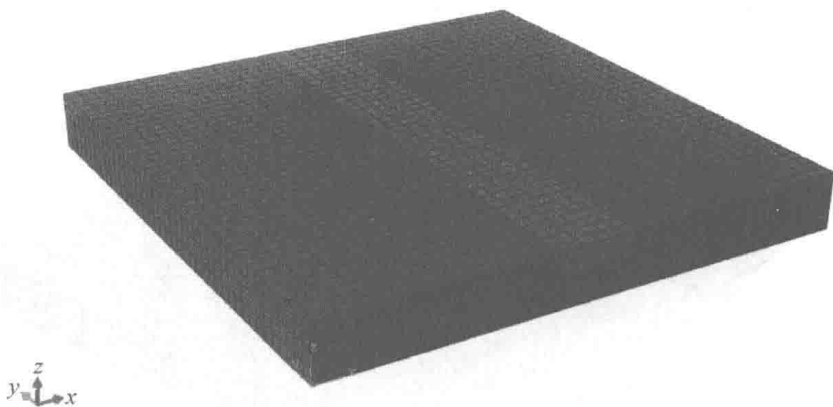




图 5-18 网格划分图

## 7. 设定力学边界条件

1) 本例属于自由状态下焊接，无须施加边界约束，但为保证不发生刚体位移，还需要增加一个固定点的约束，可取焊缝底面中点，采用全约束方式。

2) 在 Module 下拉列表中选择 Load 选项，进入 Load 模块，在工具箱中单击  按钮，打开 Create Boundary Condition 对话框，选择约束类型为 Symmetry/Antisymmetry/Encastre，然后单击 Continue 按钮，在视图区选取平板底面中心一节点，并单击 Done 按钮。

3) 在工具箱中单击  按钮创建预定义场，可设定温度载荷，即通过降温法

来间接实现焊缝区域的固有应变收缩。在打开的 Create Predefined Field 对话框中选择 Step-1 为预定义场的开始步，选择整体构件为预定义场的区域，勾选 Other 单选按钮，在 Types for Selected Step 列表框中选择 Temperature，如图 5-19 所示。然后单击 Continue 按钮，进行相应设置。

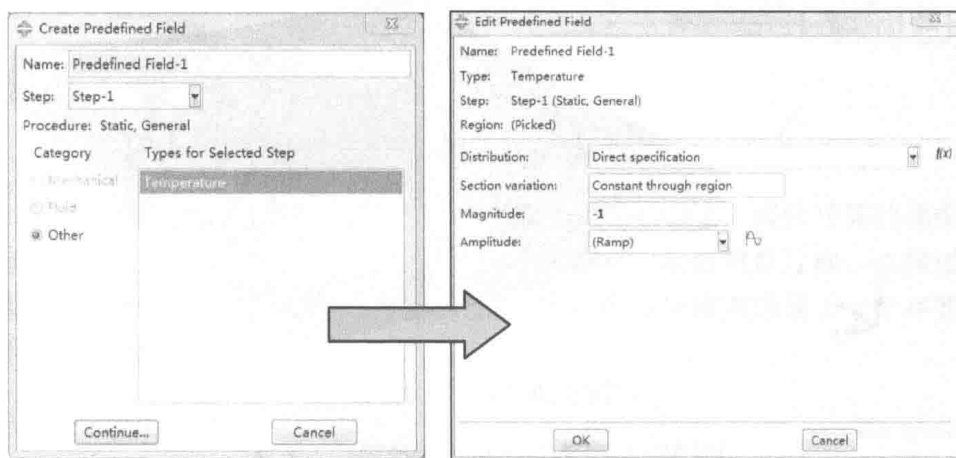


图 5-19 温度载荷的设定

## 8. 提交计算


1) 在 Module 下拉列表中选择 Job 选项，进入 Job 模块，在菜单栏中选择 Job→Create 命令，打开 Create Job 对话框，将其命名为 Inherent，然后单击 Continue 按钮，打开 Edit Job 对话框，接受所有默认选择。

2) 在菜单栏中选择 Job→Manager 命令，打开 Job Manager 对话框，单击 Write input 按钮可输出.inp 文件，单击 Submit 按钮可提交任务开始计算，单击 Monitor 按钮可观察分析的进程。

3) 分析结束后，单击 Results 按钮，对结果进行可视化。

## 9. 可视化结果

计算完成后，会在工作目录中产生一个 Inherent.odb 文件，即为结果文件。可在 Abaqus/CAE 中打开该文件，方法如下。

1) 在工具栏中单击  按钮，显示结构变形结果。

2) 在菜单栏中选择 Plot→Contours 命令，显示云图，通过菜单栏中的 Result→Field Output 命令，选择 S 可显示 Mises 应力分布，选择 U 可显示变形分布，如图 5-20 和图 5-21 所示。

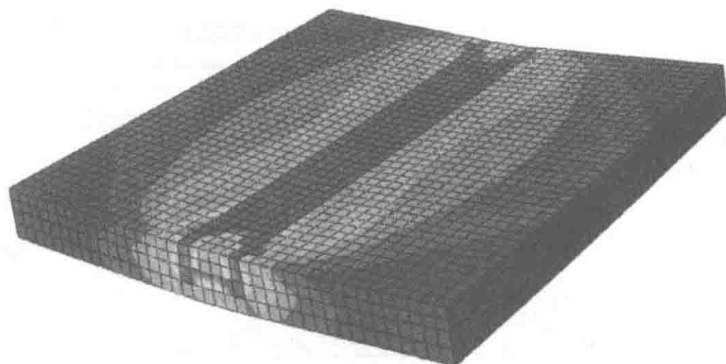
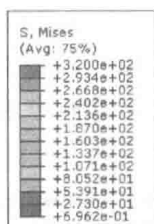


图 5-20 焊后应力分布

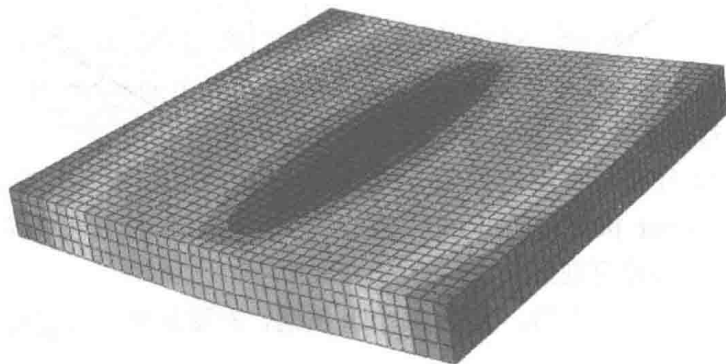
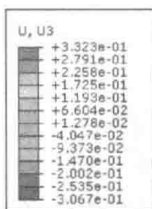


图 5-21 焊后板材厚度方向的变形分布 (放大 10 倍)

从本例而言, 采用固有应变法的模拟时间约为采用热弹塑性法的模拟时间的 1/200。模型越大, 则节约的计算成本越多。从模拟结果来看, 由于采用了平均化的方法施加固有应变, 因此采用固有应变法得到的焊后残余应力在焊缝两端区域与热弹塑性法相比还不够精确, 但分布状态比较符合规律。从焊后变形结果来看, 模拟结果与实际比较吻合, 完全可以满足一般工程上的应用要求。

## 第 6 章

# 特种焊的数值模拟

焊接方法多种多样，由于其涉及的物理过程不尽相同，因此对其的模拟方法也有所不同。本章着重介绍电阻点焊及搅拌摩擦焊的数值模拟过程。点焊过程的特殊之处在于其属于一个热-力-电耦合的过程，而搅拌摩擦焊属于一个存在剧烈塑性变形的动力学过程。

### 6.1 点焊过程的数值模拟

#### 6.1.1 电阻点焊过程的特点

电阻焊是指将组合后的工件通过电极施加压力，并利用电极电流通过接头的接触面及邻近区域，利用产生的电阻热进行焊接的方法。电阻焊利用电流流经工件接触面及邻近区域产生的电阻热效应将其加热到熔化或塑性状态，使之形成金属结合。而电阻点焊是将工件装配成搭接接头，并压紧在电极之间，利用电阻热熔化母材金属，形成焊点的电阻焊方法。典型的电阻点焊示意图如图 6-1 所示。

电阻点焊的过程一般包括以下几个阶段。

- 1) 预压阶段。通过对电极施加压力，将被焊工件压紧。
- 2) 通电焊接阶段。对电极施以一定强度的电流，工件之间由于接触电阻比较大，而发生熔化。
- 3) 断电保持阶段。通电结束，保持电极压力，使工件在电极压力作用下冷却并结合在一起。
- 4) 电极移除阶段。释放压力，形成焊核。

点焊过程的原理相对简单，但在实践应用中，其焊接过程较短，影响因素较多，并且点焊的形核始终处于封闭状态，无法直接进行有效观测。上述特点使点



焊过程的质量难以控制，也给点焊工艺的制定与优化带来一定的困难。

数值模拟的方法能够再现点焊熔核形成过程中的电、热、力等相关物理场，通过分析这些场变量与焊接质量影响因素的关系，可以对点焊物理过程有更清晰的认识，为提高焊点质量提供理论指导，并为实际生产提供理论依据。

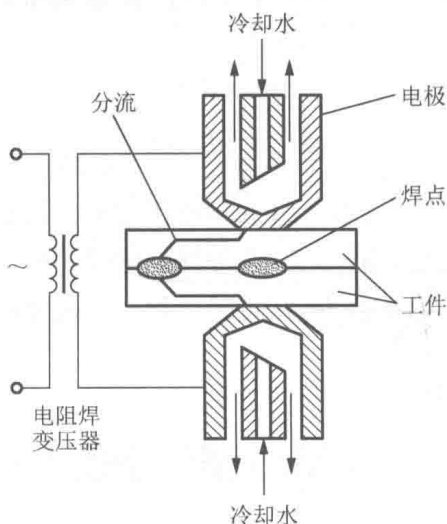


图 6-1 电阻点焊示意图

## 6.1.2 点焊数值模拟分析方法的演化过程

电阻点焊工艺应用到工业制造领域至今已有 100 多年的历史，但由于其物理机制的复杂性——涉及电、热、力、冶金及表面现象等多个方面，对其数值模拟直到 20 世纪 80~90 年代才逐渐建立起来。

电阻点焊过程的数值模拟开始于 1960 年，Archer<sup>[53]</sup>研究了一维模型中的电热现象。到 20 世纪 80 年代，Nied<sup>[54]</sup>在他的研究中开始使用接触电阻模型，并考虑了点焊过程中的热变形。在这一时期，对于点焊过程中的电热耦合、热力耦合常进行间接、区分处理。随后研究者们致力于电-热-力三物理场的直接耦合<sup>[55]</sup>，其分析方法也从有限差分法发展到有限元法，模型从一维模型发展到轴对称模型，再发展到三维模型。耦合方式上从单场分析发展到多物理场耦合分析，并且考虑的因素越来越多，越来越接近实际<sup>[56,57]</sup>。

Abaqus 通用有限元软件从 6.11 版本开始支持电-热-力的全耦合计算，为点焊的数值模拟提供了方便。下面以一个点焊数值模拟的实例进行详细说明。

## 6.2 点焊热-力-电耦合模拟综合实例

### 6.2.1 问题描述

上、下两块不锈钢薄板点焊，上板材料为 SUS301-DLT，尺寸为  $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 0.8\text{mm}$ ，下板材料为 EN1.4318，尺寸为  $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ ，圆柱形铜合金电极，如图 6-2 所示。

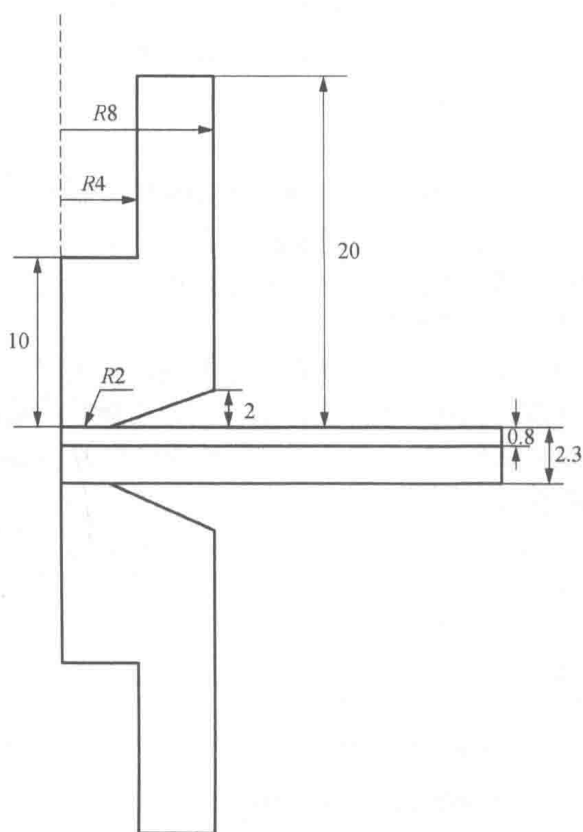


图 6-2 不锈钢点焊示意图

整个焊接过程包括预压、通电焊接、断电保持和电极移除 4 个阶段。下电极下端面将电压约束为零，上电极上端面施加等效电流为  $6500\text{A}$ ，电极压力为  $4500\text{kN}$ ，下电极下端面的位移约束为零。电极压力载荷及电载荷的加载在不同阶段有所不同，如图 6-3 所示。另外，模拟过程中需要考虑电极的水冷，换热系数取  $3800\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

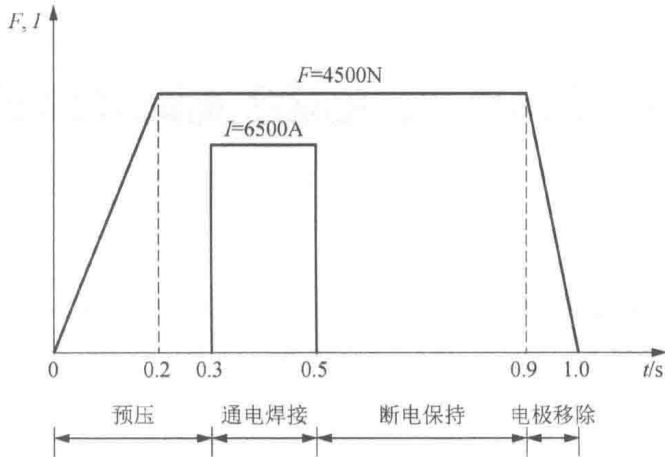


图 6-3 点焊工艺加载历程示意图

### 6.2.2 问题分析

电阻点焊过程是一个典型的热-力-电三物理场耦合问题，可采用热-力-电直接耦合的方式进行分析计算。虽然模型整体上是轴对称模型，但由于 Abaqus 目前仅支持三维的热-力-电耦合单元，因此，在本例中仍采用三维有限元建模。鉴于模型的对称性，仅建立 1/4 模型即可。

点焊问题模拟的难点还在于相互接触关系的设定。电极与工件之间、工件与工件之间都存在着复杂的相互接触关系，既包括力的接触关系，又包括热的接触关系，还包括电的接触关系，因此在设定时需特别注意。Abaqus 软件中相关的接触关系属性如图 6-4 所示。

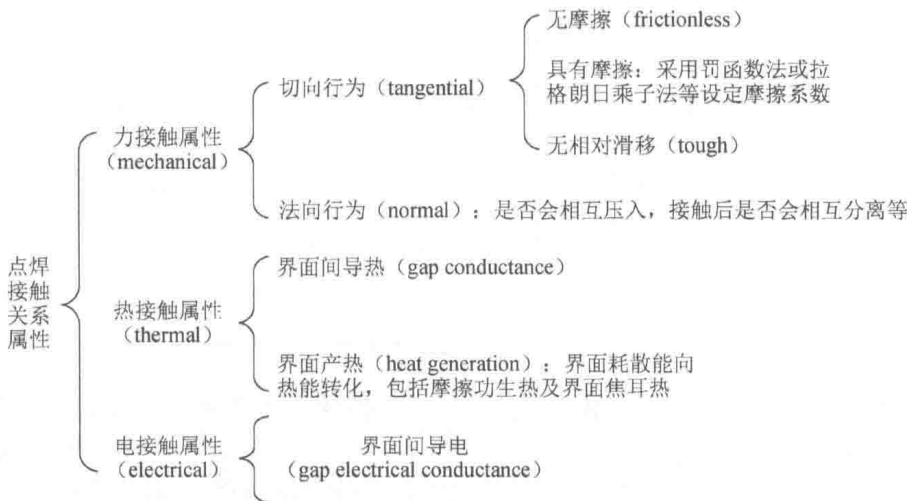


图 6-4 点焊接触关系属性

需要特别注意的是，点焊问题属于多物理场耦合计算，需要激活3个物理场，在选择单位体制时，一定要保证所选单位的自洽性。另外，要避免物理场间方程产生很高的阶数差异，这样会带来数值病态方程，影响解的精确性。例如，在热-力-电三场耦合计算中，选用 MPa 作为应力单位，可避免上述问题。综合考虑自洽性建议选用 mm-t-s 单位，详见 3.3 节。

### 6.2.3 Abaqus 热-力-电耦合分析过程

#### 1. 创建几何体

根据模型的对称性，创建 1/4 模型，依照与第 3 章类似的方法，按尺寸建立 3 个三维、可变形实体部件，包括一个电极、两个平板（上、下电极形状一样，故只需建立一个）。其中电极三维部件采用 Revolution（旋转）方式，旋转  $90^\circ$  得到，平板部件采用 Extrusion（挤压）方式得到。

创建的部件图如图 6-5 所示。

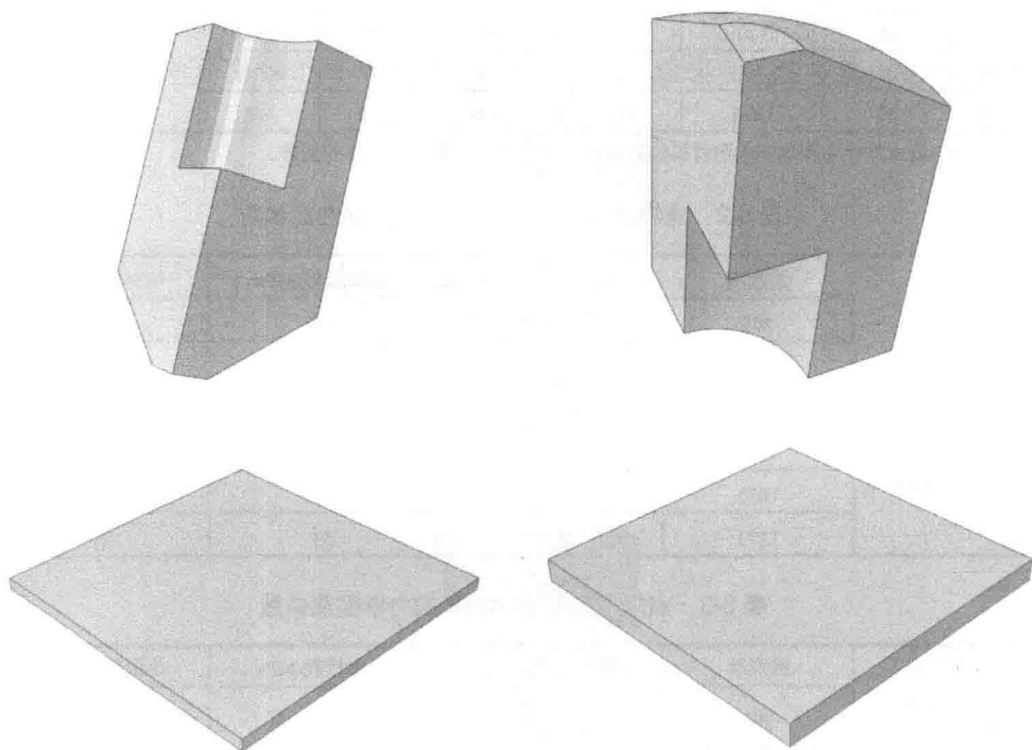



图 6-5 三维部件图

## 2. 设置材料属性

1) 在 Module 下拉列表中选择 Property 选项, 进入 Property 模块, 在菜单栏中选择 Material→Create 命令, 或者在工具箱中单击  按钮来创建新的材料。

本例中共需创建 3 种材料属性, 分别为铜电极材料、不锈钢上板材料 SUS301-DLT 及不锈钢下板材料 EN1.4318。两种不锈钢板材的电、热物理性能取相同数值, 见表 6-1; 而其他力学属性有较大差异, 分别见表 6-2 和表 6-3。其中, 由于焊接过程中温度变化较大, 除密度外其他材料性能(包括各温度区间的)在设定时应勾选 Use temperature-dependent 复选框。

表 6-1 电极及工件材料的电、热物理性能参数

T/K	热导率/ [W/ (m·K)]		电阻率/ ( $10^{-8}\Omega\cdot m$ )		比热容/ [J/ (kg·K)]		密度/ ( $kg/m^3$ )	
	不锈钢	铜电极	不锈钢	铜电极	不锈钢	铜电极	不锈钢	铜电极
294	20	390.3	72	2.64	412	397.8	7800	8900
477	20.2	370.1	85	3.99	502	418.7		
699	20.6	345.4	101	5.63	622	439.6		
922	21	320	113	8.31	876	464.7		
1144	22	310.3	124	22.06	657	477.3		
1366	20	300.1	150	31.69	690	480		

注: Abaqus 软件中要求输入的材料性能是电导率, 而电导率是电阻率的倒数。

表 6-2 点焊上板 SUS301-DLT 的力学性能参数


	温度/K	弹性模量/MPa	屈服极限/MPa	热膨胀系数/ $K^{-1}$
	点焊上板	293	84550	316
473		78723	256	1.732E-5
SUS301L-DLT	673	62280	183	1.78E-5
	873	57593	161	1.84E-5
板厚 0.8mm	1073	37800	122	1.92E-5
	1273	25217	53	2E-5


表 6-3 点焊下板 EN1.4318 的力学性能参数

点焊下板 EN1.4318 板厚 1.5mm	温度/K	弹性模量/MPa	屈服极限/MPa	热膨胀系数/ $K^{-1}$
		293	67553	396.3


续表

点焊下板	温度/K	弹性模量/MPa	屈服极限/MPa	热膨胀系数/ $K^{-1}$
EN1.4318	473	61303	251	1.732E-5
	673	58903	205	1.78E-5
板厚 1.5mm	873	55873	176	1.84E-5
	1073	53436	152	1.92E-5
	1273	35210	65.3	2E-5

2) 在菜单栏中选择 Section→Create 命令, 或者在工具箱中单击  按钮创建区域属性, 在本例中, 对应 3 种材料需要创建 3 个实体。

3) 在菜单栏中选择 Assign→Section 命令, 或者在工具箱中单击  按钮, 即将建立的区域性能赋给不同的部件, 部件颜色变绿说明部件已被赋予材料性能, 要确保所有部件都被赋予了相应的区域属性。

### 3. 组装部件

1) 在 Module 下拉列表中选择 Assembly 选项, 进入 Assembly 模块。在菜单栏中选择 Instance→Create 命令, 或者在工具箱中单击  按钮, 打开 Create Instance 对话框, 选择导入创建的部件, 其中电极有两个, 因此需要导入两次。

2) 通过对实例的旋转与平移, 将 4 个实例组装到相应位置, 如图 6-6 所示。

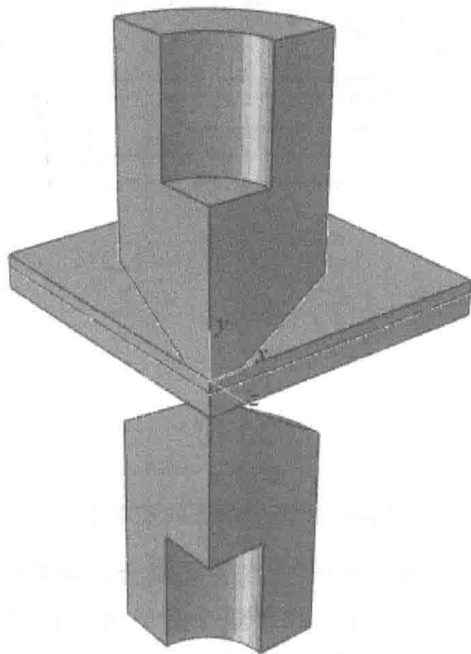



图 6-6 部件的组装

#### 4. 定义分析步

1) 对应点焊过程的 4 个物理阶段, 建立 4 个分析步。分别为预压分析步、通电焊接步、保持步与移除步。

在 Module 下拉列表中选择 Step 选项, 进入 Step 模块, 在菜单栏中选择 Step→Create 命令, 或者在工具栏中单击  按钮, 打开 Create Step 对话框, 命名分析步为 preload, 选择分析步类型为 Coupled thermal-electrical structural (热-力-电耦合分析)。然后单击 Continue 按钮, 打开 Edit Step 对话框, 在 Description 文本框中输入“**This is a preload step**”, 接受默认的 Transient(瞬态分析)类型。在 Time period 文本框中输入此分析步的持续时间, 按点焊工艺取 0.2s。

因为点焊计算中会涉及较大的构件位移, 所以选择 Nlgeom (几何非线性) 为 On。另外, 由于存在着复杂的接触关系, 计算过程中容易出现不收敛的情况, 因此在 Automatic stabilization 下拉列表中选择 Specify dissipated energy fraction (定义耗散能比例) 选项, 保持默认的比例系数 0.0002, 其他保持默认设置, 如图 6-7 所示。



图 6-7 预压分析步的基本设置

2) 由于点焊模拟涉及热-力-电三物理场耦合, 而且伴随着较大的塑性变形, 因此, 对于收敛性的要求也较高, 选择较小的分析增量步才能保证计算收敛。按图 6-8 所示在 Incrementation 选项卡中输入相关数据, 单击 OK 按钮, 完成预压分析步的创建。



图 6-8 预压分析增量步设置

3) 采用类似方法建立另外 3 个分析步, 通电焊接步、保持步、移除步的时长应与点焊工艺保持一致, 分别取 0.22s、0.4s 与 0.1s。相关参数可参照下列语句进行设置, 这里不再赘述。

预压分析步:

```
*Step, name=Step-1, inc=10000, nlgeom
*Coupled temperature-displacement, electrical, deltmx=1000,
stabilize
0.0005, 0.2, 1e-07, 1
```

通电焊接步:

```
*Step, name=Step-2, inc=10000, nlgeom
*coupled temperature-displacement, electrical, deltmx=1500,
stabilize
0.0005, 0.22, 1e-07, 0.02
```

保持步:

```
*Step, name=Step-3, inc=10000, nlgeom
*Coupled temperature-displacement, electrical, deltmx=1500,
stabilize
```



0.001, 0.4, 1e-06, 0.2

移除步:

```
*Step, name=Step-4, inc=10000, nlgeom
*Coupled temperature-displacement, electrical, deltmx=1000,
stabilize
0.0001, 0.1, 1e-07, 0.02
```

### 5. 定义相互接触

1) 本例中的相互接触关系包括上/下电极-工件接触(2对)和工件-工件接触(1对), 因此共需要建立3对接触关系。

2) 首先定义接触属性, 本例应包括两类接触属性, 分别为电极-工件接触属性和工件-工件接触属性。

在 Module 下拉列表中选择 Interaction 选项, 进入 Interaction 模块, 在工具栏中单击  按钮定义接触属性。在打开的 Create Interaction 对话框中, 将第一个接触属性命名为 Elec-Plate, 接触类别选择 Contact(接触), 然后单击 Continue 按钮。在随后打开的 Edit Contact Property(编辑接触属性)对话框中分别设定 Mechanical(力学)接触属性、Thermal(热)接触属性及 Electrical(电)接触属性。

参照图 6-4, 力学接触属性主要设定两面之间的切向行为与法向行为。在切向行为中可以采用罚函数法设定滑动摩擦系数为 0.2; 在法向行为中应设定为两接触面之间不可相互侵入。

热接触属性包括界面间导热及界面产热两大方面。界面间导热主要设定两面之间的传热系数与两面间隙之间的关系, 默认以一个表的形式输入, 设定中需勾选温度相关性, 相关数据见表 6-4。

表 6-4 界面间传热相关数据

T/K	间隙/mm	界面间传热系数/[mW/(mm <sup>2</sup> ·K)]	
		工件-工件	电极-工件
294	0	140	560
294	0.001	0	0
477	0	150	640
477	0.001	00	0
922	0	160	1300

续表

T/K	间隙/mm	界面间传热系数/ [mW/ (mm <sup>2</sup> ·K)]	
		工件-工件	电极-工件
922	0.001	0	0
1144	0	160	4800
1144	0.001	0	0

界面产热主要设定过程中有多少摩擦能或电能转变为热能,以及有多少热能会传给从面,此处需要输入一个比例系数。在本例中分别设为 1.0 和 0.5,即在此接触面有 100%的能量转化为热能,产生的热能中有 50%会传给从面。

点焊接触还包括电接触属性,这样电流才能从电极流向工件,并产生焦耳热。界面接触电阻率见表 6-5。注意, Abaqus 软件中要求给出的是界面接触电导率,即接触电阻率的倒数。

表 6-5 界面接触电阻率


T/K	界面接触电阻率/ (mΩ · mm <sup>2</sup> )	
	工件-工件	电极-工件
294	0.157	0.0785
477	0.157	0.0669
699	0.155	0.049
922	0.149	0.0188
1144	0.117	—
1366	0.07	—


设定完成的接触属性如图 6-9 所示。



图 6-9 电极-工件接触属性设定

3) 定义接触对。本例中共有 3 个接触对需要定义, 分别为上电极与上平板、上平板与下平板及下平板与下电极。具体操作如下。

在工具箱中单击  按钮, 在打开的 Create Interaction 对话框中选择 Surface-surface contact (面-面接触), 然后根据提示选择接触对中的主面与从面。一般地, 在接触关系中, 把较硬的面适合作为主面, 因此在电极与工件接触对中, 应选择电极材料作为主面。在弹出的接触对选项中, 选择 Small sliding (小滑移) 作为滑移方式, 并选择相应的接触属性, 最后单击 OK 按钮完成设置。

4) 散热边界设定。在工具箱中单击  按钮, 在打开的 Create Interaction 对话框中选择 Surface film condition (表面膜条件), 并选择 Step-2 即焊接步为开始步, 如图 6-10 所示。然后单击 Continue 按钮, 打开 Edit Interaction 对话框, 选取上下电极内部表面作为散热面, 指定膜系数为  $3.8\text{mW} (\text{mm}^2 \cdot \text{K})$ , 并设热沉即冷却水温度为 283K, 如图 6-11 所示, 最后单击 OK 按钮完成设置。

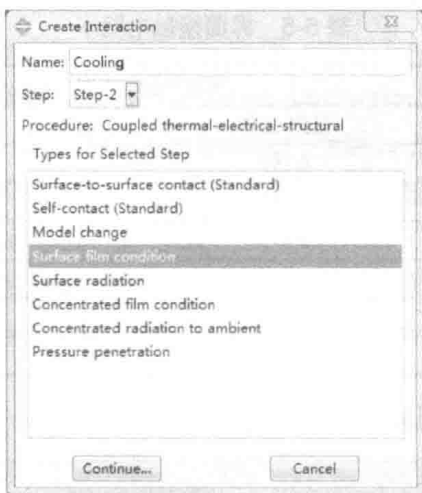



图 6-10 水冷条件设置

## 6. 定义载荷与边界条件

1) 在 Module 下拉列表中选择 Load 选项, 进入 Load 模块, 施加载荷和边界条件。

2) 在工具箱中单击  按钮创建边界条件。本例中有两类边界条件: 力学边界条件和电势边界条件。力学边界条件包括下电极底面的全约束 (ENCASTRE) 和对称面上的对称约束 (分别为 XSYMM,  $x$  轴对称约束与 ZSYMM,  $z$  轴对称约束); 电势边界条件为下电极底面的电势要约束为 0, 这样电流载荷才会从上电极流经工件, 再流过下电极。

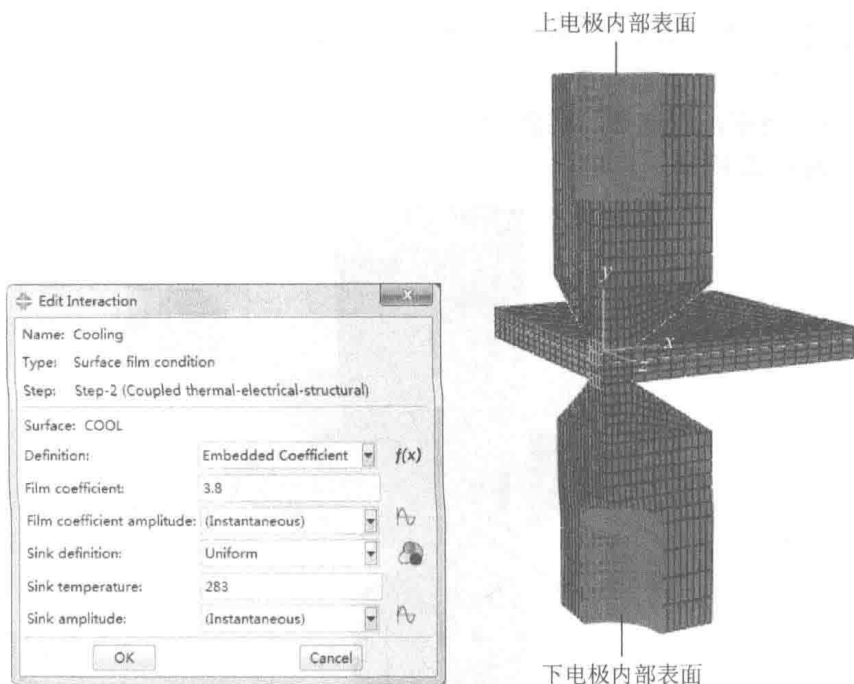



图 6-11 散热条件设置

3) 在工具箱中单击  按钮创建载荷。同样，本例中有力学载荷与电载荷。力学载荷为上电极表面施加的电极压力，其作用时间应从预压分析步开始，到移除步结束，预压力大小计算如下。

电极上表面积：

$$S = \pi R_1^2 - \pi R_2^2 = \pi \times 8^2 - \pi \times 4^2 \approx 150.72 \text{ (mm}^2\text{)}$$

电极压力：

$$P = \frac{F}{S} = \frac{4500}{150.72} \approx 29.86 \text{ (MPa)}$$

电载荷为上电极表面施加的电流密度，其作用时间应从通电焊接步开始，到保持步结束。

电流密度：

$$j = \frac{I}{S} = \frac{6500}{150.72} \approx 43.13 \text{ (A/mm}^2\text{)}$$

## 7. 划分网格

1) 在 Module 下拉列表中选择 Mesh 选项，进入 Mesh 模块，进行网格划分。为了保证计算精度，采用渐进式的划分方法，在接触面附近及变化较剧烈的区域

单元尺寸较小（为 0.5mm 左右），而在温度、应力变化较小的地方采用较大的网格划分。

2) 在本例中，应选择三维热-力-电耦合单元 Q3D8R 和 Q3D6，划分好网格的模型如图 6-12 所示。

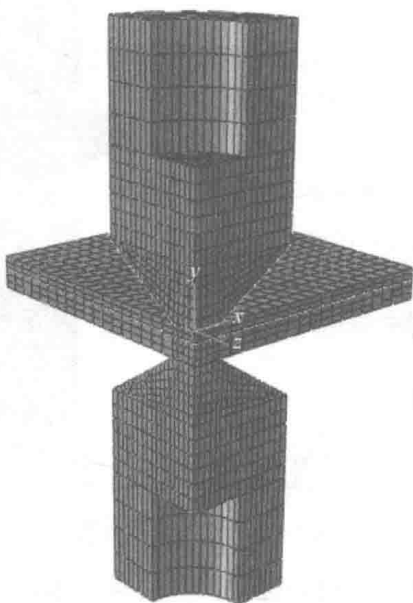


图 6-12 模型网格划分图

#### 8. 建立任务并提交计算


1) 在 Module 下拉列表中选择 Job 选项，进入 Job 模块，在菜单栏中选择 Job→Create 命令，打开 Create Job 对话框，将其命名为 Spotwelding，然后单击 Continue 按钮，打开 Edit Job 对话框，保持所有默认设置。

2) 在菜单栏中选择 Job→Manager 命令，打开 Job Manager 对话框，单击 Write input 按钮可输出.inp 文件，单击 Submit 按钮可提交任务开始计算，单击 Monitor 按钮可观察分析的进程。

3) 分析结束后，单击 Results 按钮，对结果进行可视化。

#### 9. 可视化结果

在计算完成后，会在工作目录中产生一个 Spotwelding.odb 文件，即为结果文件。可在 Abaqus/CAE 中打开该文件，方法如下。

1) 在工具栏中单击  按钮，显示结构变形结果。

2) 在菜单栏中选择 Plot→Contours 命令，显示云图，通过菜单栏中的 Result→

Field Output 命令，选择 NT11（即节点温度）可以显示温度分布。单击工具栏中的  $\ll \ll \gg \gg$  按钮，可以显示不同时刻的温度场结果，典型温度场结果如图 6-13 所示。

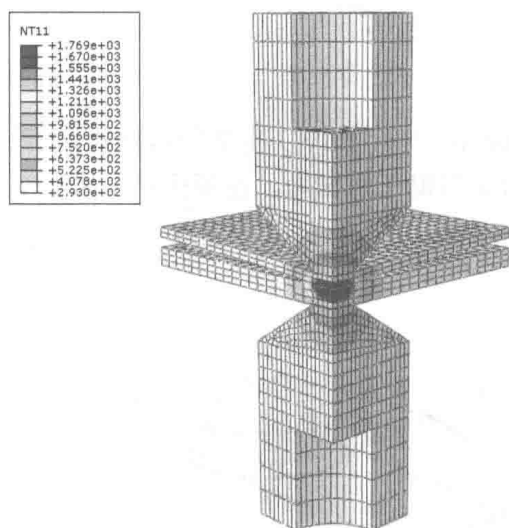


图 6-13 点焊过程中的温度场

可见，工作接触面间的温度最高，达到了材料的熔点，冷却后形成熔核。而电极及工件非接触部分则具有较低的温度。通过输出不同变量，还可观测应力、应变、电流密度的分布情况云图。焊接完成后的应力分布云图与变形分布云图如图 6-14 和图 6-15 所示。

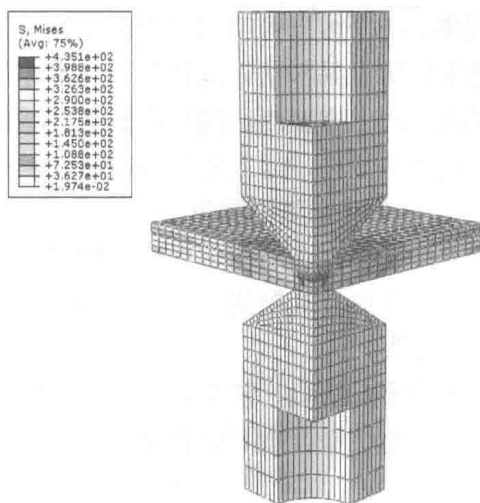


图 6-14 点焊完成后的应力分布云图

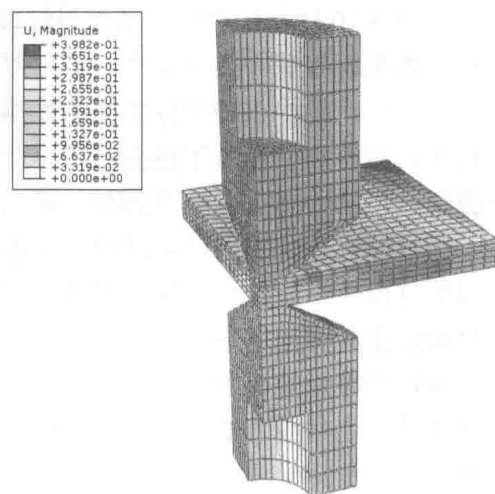


图 6-15 点焊完成后的变形分布云图

## 6.3 搅拌摩擦焊的数值模拟

### 6.3.1 搅拌摩擦焊简介

搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 是英国焊接研究所于 1991 年研究发明的一种固相焊接技术。其是借助于机械力, 在摩擦热、塑性变形热作用下的一种固相连接方法, 如图 6-16 所示。

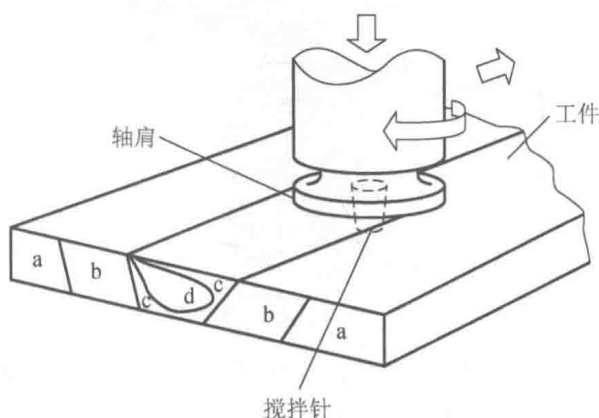


图 6-16 搅拌摩擦焊示意图

a—母材; b—热影响区; c—热机影响区; d—焊接区

如图 6-16 所示, 在搅拌摩擦焊焊接过程中, 一个柱形带特殊轴肩和搅拌针的搅拌头高速旋转着并插入工件, 工件两侧固定以防止其移动。搅拌头一边高速旋转一边移动, 搅拌头和工件之间的摩擦剪切阻力产生摩擦热, 搅拌头附近区域的材料在剧烈的塑性变形下也会产热, 使工件发生热塑化, 但工件的最高稳定温度不会超过材料的熔点, 属于固相焊接。

当搅拌头旋转着向前移动时, 热塑化的工件从搅拌头的前方向后方转移, 其周围的材料也不断地被加热、搅拌、混合, 并且在搅拌头轴肩与工件表层的摩擦产热和锻压共同作用下, 形成致密的固相连接接头。

搅拌摩擦焊的优点是避免了一般熔焊焊接的冶金缺陷, 接头性能优异, 焊接过程简单, 生产成本低, 焊接无污染。其在铝合金、镁合金等轻金属结构的连接制造中有一定的优势。

### 6.3.2 搅拌摩擦焊的数值模拟方法

数值模拟技术是研究搅拌摩擦焊过程的一种有效方法。搅拌摩擦焊存在大应变、高温剧烈塑性变形与热塑性流动，其焊接过程具备强烈的非线性动力学过程特点，对其进行数值模拟比较困难。研究者往往借助于简化模型或者着重模拟计算搅拌摩擦焊过程的某一方面来进行数值模拟研究。下面介绍两种搅拌摩擦焊数值模拟方法：一种是简化了的准静态模拟方法，另一种是应用自适应网格技术的动态模拟方法。

#### 1. 准静态模拟方法

准静态模拟方法是將搅拌摩擦焊的动态过程简化为一个准静态过程，在简化热源的作用下，采用间接耦合的方式，顺序计算搅拌摩擦焊过程的温度场与应力场<sup>[58]</sup>。

首先计算搅拌摩擦焊的温度场。搅拌摩擦焊过程的能量来源为搅拌头的旋转，其总能量可通过下式计算：

$$Q_{\text{total}} = \eta M_z \omega = \frac{2\pi n \eta M_z}{60} \quad (6-1)$$

式中， $Q_{\text{total}}$ ——焊接总能量输入；

$M_z$ ——搅拌头转矩；

$\omega$ ——搅拌头角速度；

$n$ ——搅拌头转速。

在搅拌头搅拌区域，将总能量输入分为表面热流和体热流：

$$\begin{cases} Q_s = 0.75 Q_{\text{total}} \\ Q_v = 0.25 Q_{\text{total}} \end{cases} \quad (6-2)$$

式中， $Q_s$ ——等效表面热流；

$Q_v$ ——等效体热流。

其中，表面热流主要来自工件表面与搅拌头轴肩的摩擦生热，表面热流密度可表示为

$$q_s(r) = \frac{3Q_s r}{2\pi(R_1^3 - R_0^3)} (R_0 \leq r \leq R_1, z = H) \quad (6-3)$$

式中， $q_s(r)$ ——表面热流密度；

$r$ ——积分点到搅拌针中心的距离；

$R_0$ ——搅拌针半径；

$R_1$ ——轴肩半径；



$H$ ——板厚；

$z$ ——模型厚度方向坐标，并以  $z=0$  作为工件下表面。

体热流主要来自搅拌头旋转引起的剧烈塑性变形及热塑性流动，体热流密度可表示为

$$q_v(r) = \frac{Q_v}{\pi R_0^2 h} \quad (r \leq R_0, 0 < z < h) \quad (6-4)$$

式中， $q_v(r)$ ——体热流密度；

$h$ ——搅拌针长度。

将表面热流与体热流作为组合热源加入工件中，即可得到搅拌摩擦焊焊接温度场（图 6-17），方法同第 3 章热弹塑性法，这里不再赘述。

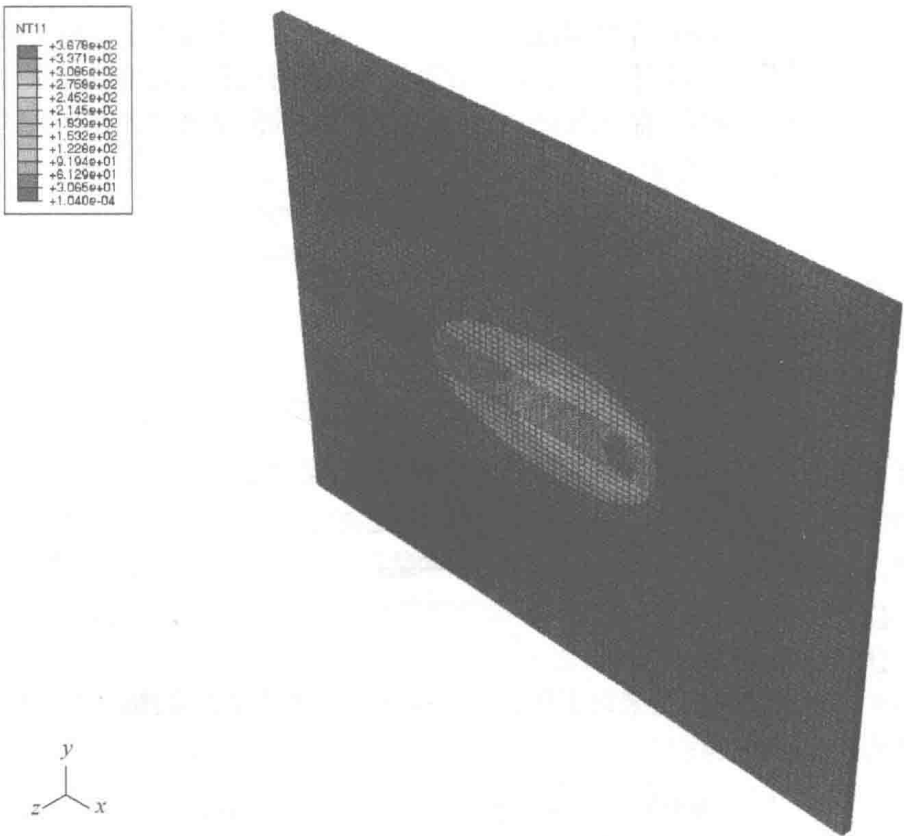


图 6-17 搅拌摩擦焊焊接温度场

温度场计算完成后，进行应力场分析。搅拌摩擦焊焊后残余应力场不仅由焊接温度场引起，搅拌头的高速旋转也会对力学过程产生显著的影响。通过一定的简化可将搅拌头的作用力分解为 3 个方向的力的作用：搅拌头下压力及搅拌头范

围内两个方向分布的圆周切向力，分别表示如下。

表面压力  $P$ ：

$$P = \frac{F_z}{\pi R_1^2} \quad (6-5)$$

式中， $F_z$ ——搅拌头下压力。

圆周切向力：

$$\begin{cases} F_x = \frac{3M_z}{2\pi h R_1^3} \cdot \left(\frac{-y}{r}\right) \\ F_y = \frac{3M_z}{2\pi h R_1^3} \cdot \left(\frac{x}{r}\right) \end{cases} \quad (6-6)$$

式中， $F_x$ —— $x$ 方向切向力；

$F_y$ —— $y$ 方向切向力；

$x$ ——积分点  $x$  方向坐标；

$y$ ——积分点  $y$  方向坐标。

将温度场结果作为温度载荷，增加力学边界条件后可得搅拌摩擦焊焊接应力场与焊接后变形，如图 6-18 和图 6-19 所示。

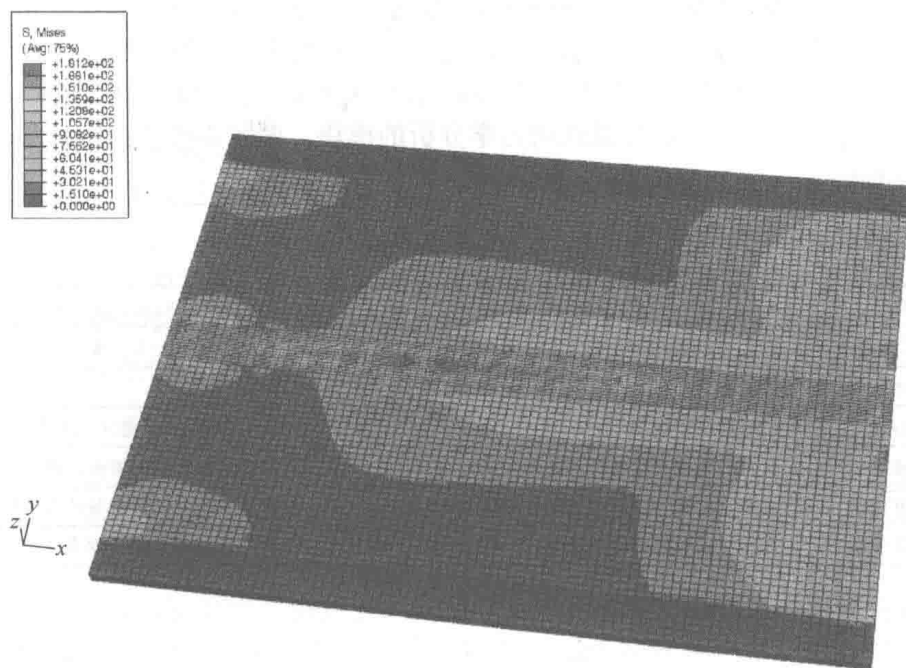


图 6-18 搅拌摩擦焊焊接应力场

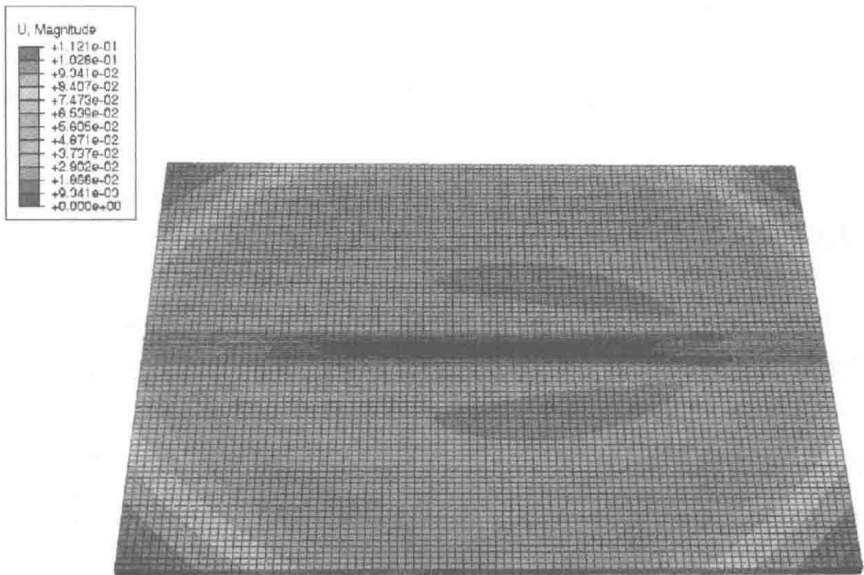


图 6-19 搅拌摩擦焊焊接后变形云图

## 2. 动态模拟方法

搅拌摩擦焊过程从本质上说是一个动态的动力学过程，动力学过程是惯性和阻尼起重要作用的过程。对于动力学过程，宜采用动力学分析方法进行分析。

Abaqus 中的两大求解器分别为 Abaqus/Explicit 与 Abaqus/Standard，其中 Abaqus/Explicit 是用来进行显式动力学分析的模块，两种求解器的特点与功能对比见表 6-6。

表 6-6 两种求解器的特点与功能

模块	Abaqus/Standard	Abaqus/Explicit
单元库	提供了丰富的单元库	是 Standard 的一个子集
分析过程	静态或准静态	动态
材料模型	广泛的材料模型	类似于 Standard，但允许材料失效
接触	具有较强健的接触计算能力	能够解决较复杂的接触问题
求解技术	基于刚度矩阵，具有无条件稳定性	基于显式积分，具有条件稳定性
计算成本	非线性问题需要大量迭代，占用大量空间与内存	相对于 Standard 要小得多

搅拌摩擦焊过程是一个具有大变形的非线性过程，为保证计算收敛，一般需要应用自适应网格 (adaptive mesh) 技术<sup>[59,60]</sup>。在 Abaqus 中有两大类自适应网格技术：自适应网格重划分 (adaptive remeshing) 技术和任意的拉格朗日-欧拉方法 (arbitrary Lagrangian and Eulerian, ALE)。本书主要介绍第二种方法。

在有限元分析中有拉格朗日方法和欧拉方法两大类分析方法。拉格朗日方法是一种比较经典的分析方法。该方法采用的是拉格朗日坐标，反映了物体质点与它瞬间所处的位置关系，不同的坐标代表不同的质点，也称为物质坐标。对于有限元法来说，也就是材料与网格结合在一起，网格代表坐标，材料就是无数个质点，二者在整个分析过程中是联系在一起的。

欧拉方法则是用欧拉坐标描述的。欧拉坐标只识别空间，所以也称空间坐标，每一个坐标代表一个空间点，同一个空间点在不同的时刻可以由不同的物质点占据。对于有限元法来说，也就是欧拉网格与材料完全脱离，而且欧拉网格允许网格不被材料 100% 充满。

由此可见，两种方法各具优缺点：拉格朗日方法对于大变形情况，收敛困难，但比较容易施加边界条件；而欧拉方法比较适合大变形（甚至流体），但不容易施加边界条件。

任意的拉格朗日-欧拉方法结合了单纯的拉格朗日方法与欧拉方法的分析特征，使网格在整个分析过程中保持一种比较好的状态，不出现巨大的扭曲与变形。它的主要原理是使网格脱离材料而流动，但与欧拉方法不同，比较明显的一个不同点就是它的网格必须被一种材料充满。

在 Abaqus 中应用 ALE 自适应网格技术，需要定义自适应区域（adaptive domain）、自适应表面（adaptive boundary region）及自适应表面的网格约束（mesh constraint）等。

自适应区域是指在计算过程中会应用 ALE 网格重划分技术的区域，在此区域内，材料会脱离网格运动。

自适应表面是指自适应区域的外围边界，其表面类型可分为滑移面（sliding surface）与欧拉面（eulerian surface）。滑移面上的材料可脱离网格沿滑移面的切向运动，但不能沿滑移面的法向运动。自适应区域的外围表面默认都是滑移面。欧拉面上的材料可穿透表面，沿表面的法向运动。欧拉表面需要特殊定义，一般还要对欧拉面的网格在法向上进行网格约束。

下面以一个具体实例对搅拌摩擦焊的动力学模拟过程进行详细说明。

## 6.4 搅拌摩擦焊动力学模拟实例

### 6.4.1 问题描述

6082-T6 铝合金平板（70mm×50mm×3mm），沿中间线进行搅拌摩擦焊。搅拌

针和轴肩半径分别为 3mm 和 9mm，搅拌针长度为 3mm。焊接开始前，轴肩下压量为 0.1mm。焊接过程中，搅拌头转速为 1200r/min，焊接速度为 2mm/s。

## 6.4.2 问题分析

采用 ALE 自适应网格技术对搅拌摩擦焊过程进行模拟，问题的关键在于自适应区域的相关设定，在本例中，各区域的设定如图 6-20 所示。

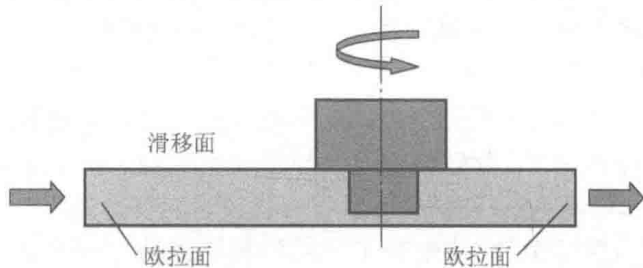


图 6-20 自适应区域设置图

搅拌摩擦焊焊接过程中搅拌头高速旋转，且搅拌头和工件铝合金相比强度、硬度较高，可设为刚体。工件被搅拌区域会产生剧烈的塑性变形，可将工件整体设为自适应区域，并设想工件材料体由左侧流入，由右侧流出，来模拟焊接相对运动。这样，可设定平板左、右两侧为欧拉面（材料体可垂直网格运动），而平板上下表面因需设定摩擦等边界条件，故采用自适应区域的默认表面类型——滑移面（材料体可沿表面切向运动）。

## 6.4.3 搅拌摩擦焊动力学分析过程

### 1. 创建几何体

首先按尺寸建立两个部件，其中焊接平板采用可变形体，搅拌针可采用分析刚体。创建的焊接平板与搅拌头部件如图 6-21 所示。

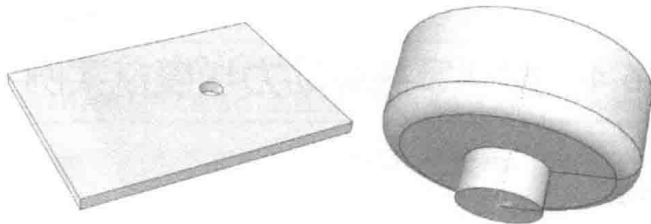


图 6-21 焊接平板与搅拌头部件

## 2. 设置材料属性

6082-T6 铝合金的密度取  $2700\text{kg/m}^3$ ，且忽略随温度的变化，其他热物理性能见表 6-7。

表 6-7 6082-T6 铝合金材料的热物理性能

温度/K	298	373	473	573	673	773	873
热导率/[W/(m·K)]	201	212	213	223	240	246	256
比热容/[J/(kg·K)]	955	1001	1064	1103	1150	1241	1350
弹性模量/GPa	75	69	56	40	26	18	—
线膨胀系数/ $10^{-6}\text{K}^{-1}$	22.8	23.2	24.7	25.5	26.5	27.5	28.5

由于计算过程中材料经历剧烈的动态变形，采用 Johnson-Cook 模型来定义材料的力学响应。Johnson-Cook 模型是一种黏塑性材料模型，考虑了材料的应变、应变率及温度对材料强度与塑性形变的影响。Johnson-Cook 模型的形式如下：

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{\text{pl}})^n] \left[ 1 + C \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{\text{pl}}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right)^m \right] \quad (6-7)$$

式中， $\bar{\sigma}$ ——等效应力；

$\bar{\epsilon}^{\text{pl}}$ ——等效塑性应变；

$\dot{\bar{\epsilon}}^{\text{pl}}$ ——等效塑性应变率；

$\dot{\epsilon}_0$ ——参考应变率；

$n$ ——硬化指数；

$T$ ——当前温度；

$T_{\text{room}}$ ——室温；

$T_{\text{melt}}$ ——熔点；

$A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $m$ ——材料常数。

6082-T6 铝合金 Johnson-Cook 模型各参数见表 6-8。

表 6-8 6082-T6 铝合金 Johnson-Cook 模型参数<sup>[61]</sup>

$A$	$B$	$n$	$C$	$m$	$T_{\text{melt}}$	$\dot{\epsilon}_0$
285	94	0.41	0.002	1.34	861	1

按如上所述定义材料属性，并赋予相应的铝合金平板部件。

## 3. 网格划分与组装

将材料属性赋予部件后进行网格的划分，由于本例属于大变形过程，搅拌及

邻近区域采用较细的网格划分（约 0.2mm），而平板单元采用较为粗大的网格（约 1.5mm）。全部为六面体单元，单元类型采用热-力耦合单元 C3D8RT，组装两个部件，如图 6-22 所示。

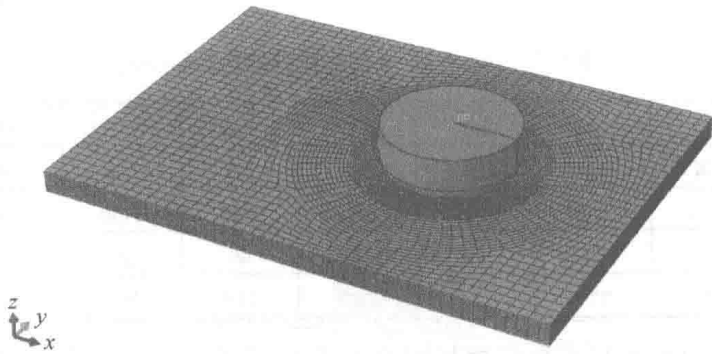


图 6-22 部件组装与网格划分

#### 4. 定义分析步与自适应区域

分析步类型选择热-力耦合显式动力学分析。这里共建立了 3 个分析步。第 1 步为预压分析步，时长 0.5s，用来模拟搅拌头压入工件过程。第 2 步为搅拌头开始旋转并达到工艺转速，时长 0.5s。第 3 步为焊接步，工件开始运动，开始焊接，时长为 10s。所有步均需激活 Nlgeom（几何非线性）选项。

在 Edit Step 对话框中选择 Mass scaling（质量放大）选项卡，进入 Mass scaling 设置。质量放大是显式动力学计算中常用的加快计算速度的方法。通过在计算过程中放大材料的质量，以达到加快计算速度的目的。对于质量放大后结果的准确性，一般通过后处理过程中比较计算全过程的动能与内能比来确定。如果在计算全过程中动能只占总内能的 5% 以下，则可认为质量放大后对计算结果并无显著影响，反之则要调小质量放大系数。在本例中取质量放大系数为  $1 \times 10^6$ ，相关设置如图 6-23 所示。

自适应区域将在网格严重扭曲时进行网格的重新划分，在本例中选取整个铝合金焊板为自适应区域。在 Module 下拉列表中选择 Step 选项，进入 Step 模块，在菜单栏中依次选取 Other → ALE Adaptive Mesh Domain → Edit → Step-1 命令，对第一步的自适应区域进行设置，在打开的 Edit ALE Adaptive Mesh Domain 对话框中勾选 Use the ALE adaptive mesh domain below 单选按钮，选择整个焊板作为自适应区域，并在 Frequency（频率）文本框中输入“1”，即每一个增量步进行一次网格自适应计算；在 Remeshing sweeps per increment（每增量步网格重画扫掠）文本框中输入“10”，即每增量步进行 10 次网格重划，如图 6-24 所示。



图 6-23 质量放大系数设置

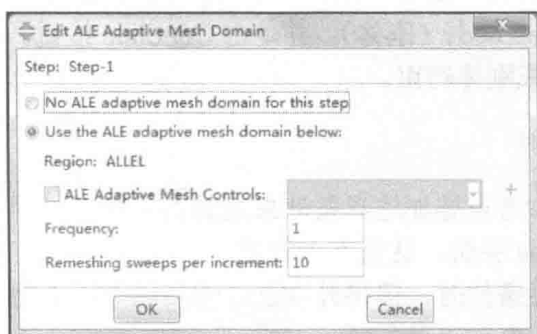


图 6-24 自适应区域及强度设置

另外两步的参数设置可参照第一步进行设定，由于可预计网格扭曲程度要比第一步严重，可适当增大网格重划强度，在 Remeshing sweeps per increment 文本框中分别输入“20”和“30”。

### 5. 设定相互接触关系

为搅拌头外表面、焊板上表面及中孔表面设置相互接触关系。在搅拌头与工件接触对中设定切向摩擦算法为罚函数法，摩擦系数取 0.3；法向接触关系为 Hard



(相互不可侵入)；界面生热系数为 0.8，即界面上有 80%的摩擦功转化为热，如图 6-25 所示。

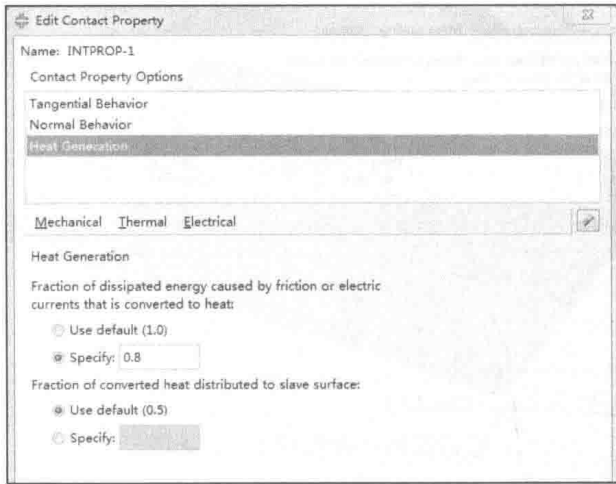




图 6-25 相互接触关系设定



接下来，需要指定搅拌头的刚体参考点。在 Interaction 模块中单击  按钮，进入参考点设置。选取搅拌头中心轴线上一点，命名为 RP-1，作为其刚体参考点。单击  按钮进行约束关系设定。在打开的 Create Constraint (创建约束) 对话框中，选取约束种类为 Rigid body (刚体)，并单击 Continue 按钮，选取搅拌头外表面与其参考点 RP-1，完成刚体约束。

## 6. 施加边界条件

通过对搅拌头参考点施加边界条件来控制其下压及旋转，具体操作方法可参考前面章节及 Abaqus 手册，这里不再赘述。

对焊板施加边界条件时，需格外注意。因其已被定义为自适应区域，因此不能对其施加常规的约束与边界条件。

由于在进行自适应区域指定时，已指定工件整体为自适应区域，因此工件表面均为默认的滑移面。如果需要对材料的流动进行设定，以模拟焊接时工件与搅拌头的相对运动，则需要指定左右端面为欧拉面，如图 6-20 所示。

对于欧拉面的指定，不支持在 Abaqus/CAE 视图区操作，需要在 .inp 文件中完成相关设定。首先，在菜单栏中选择 Tool→Surface→Create 命令创建表面，选择焊板左右端面分别创建入口面 (inflow) 与出口面 (outflow)，然后将 .inp 文件导出。由 Abaqus/CAE 导出 .inp 文件的方法是在 Module 下拉菜单中选择 Job 选项，进入 Job 模块，单击  按钮，创建并命名一个作业，如命名为 fsw，再在工具栏中单击  按钮，在打开的 Job Manager 对话框中单击 Write input 按钮，输出

fsw.inp, 其可用文本编辑器打开并编辑。

在.inp文件中添加对下底面(滑移面)的约束, 约束其在厚度方向上的位移, 如:

```
*Boundary, amplitude=Amp-1, REGION TYPE=SLIDING
bottom, 3, 3, 0
```

找到对入口及出口欧拉面创建的相应位置, 在\*Surface关键字行增加 region type=Eulerian 参数, 创建欧拉面, 如:

```
*Surface, name=inflow, type=element, region type=Eulerian
...
*Surface, name=outflow, type=element, region type=Eulerian
...
```

创建欧拉面后, 在相应的分步里必须对欧拉面的网格进行法向网格约束, 施加网格约束形式, 如:

```
*Adaptive Mesh Constraint
inflow, 1, 1, 0
outflow, 1, 1, 0
```

通过指定欧拉面入口速度模拟焊接的相对运动, 如:

```
*Boundary, amplitude=Amp-1, type=velocity, REGION TYPE=EULERIAN
inflow, 1, 1, 2
```

## 7. 模拟结果

典型温度场分布如图 6-26 所示。

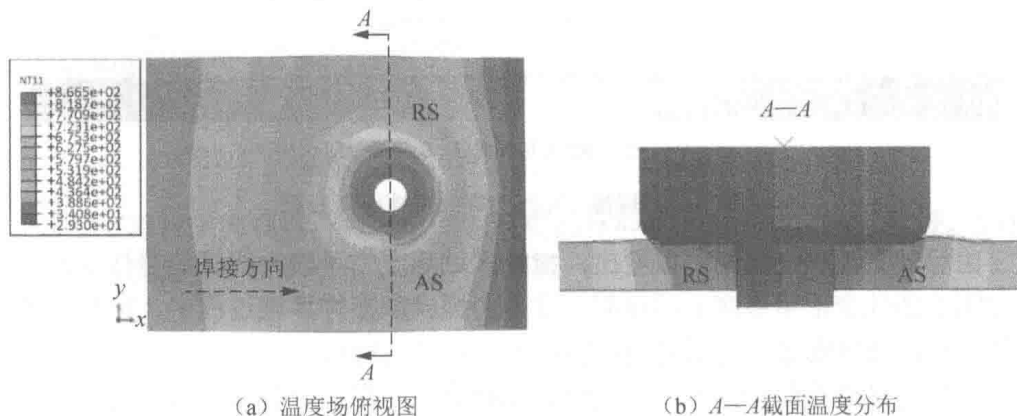
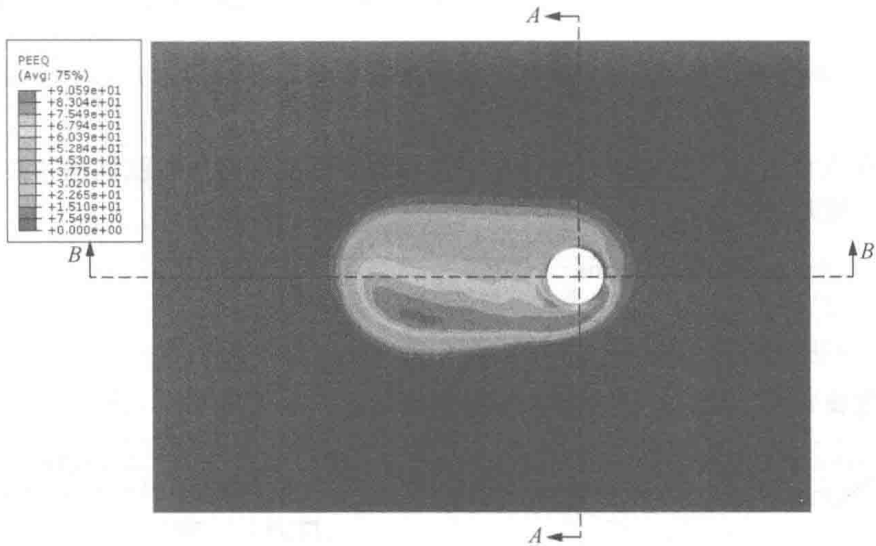


图 6-26 焊接 5s 时的温度场云图

由温度场云图可以看出, 搅拌摩擦焊焊接过程中工件高温区域出现在搅拌孔及其周围, 5s 时最高温度达到其熔点的 85%。温度场分布并非呈现对称形态, 搅拌头前方温度要小于后方, 但温度变化梯度较后方大。从  $A-A$  截面温度分布可以明显地看出, 前进侧 (AS) 与后退侧 (RS) 的温度差异, 前进侧温度要略高于后退侧。

搅拌摩擦焊焊接过程伴随着搅拌区域剧烈的塑性变形, 焊接 10s 时的等效塑性应变云图如图 6-27 所示。



(a) 等效塑性应变俯视图

(b) 等效塑性应变  $A-A$  截图

(c) 等效塑性应变  $B-B$  截图

图 6-27 焊接 10s 时的等效塑性应变云图

由等效塑性应变云图可以看出, 搅拌区域均产生了较为明显的塑性变形, 且前进侧的塑性变形明显高于后退侧, 这是由搅拌摩擦焊焊接过程中, 搅拌头带动材料旋转, 致使前进侧与后退侧材料流动方向不同所致。

通过定义追踪粒子, 可以方便地对搅拌摩擦焊焊接过程中材料的流动方向进行观测<sup>[62,63]</sup>。追踪粒子的设置并不支持在 Abaqus/CAE 视图区操作。在 .inp 文件中通过输入如下命令可设定追踪粒子:

```
*Tracer particle, tracer set=tracer-3, particle birth stages=1  
Tracer
```

通过如下命令可以输出位移，并在后处理时显示：

```
*Output, field  
*Node output, tracer set=tracer-3  
U
```

图 6-28 给出了不同时刻追踪粒子的位置。

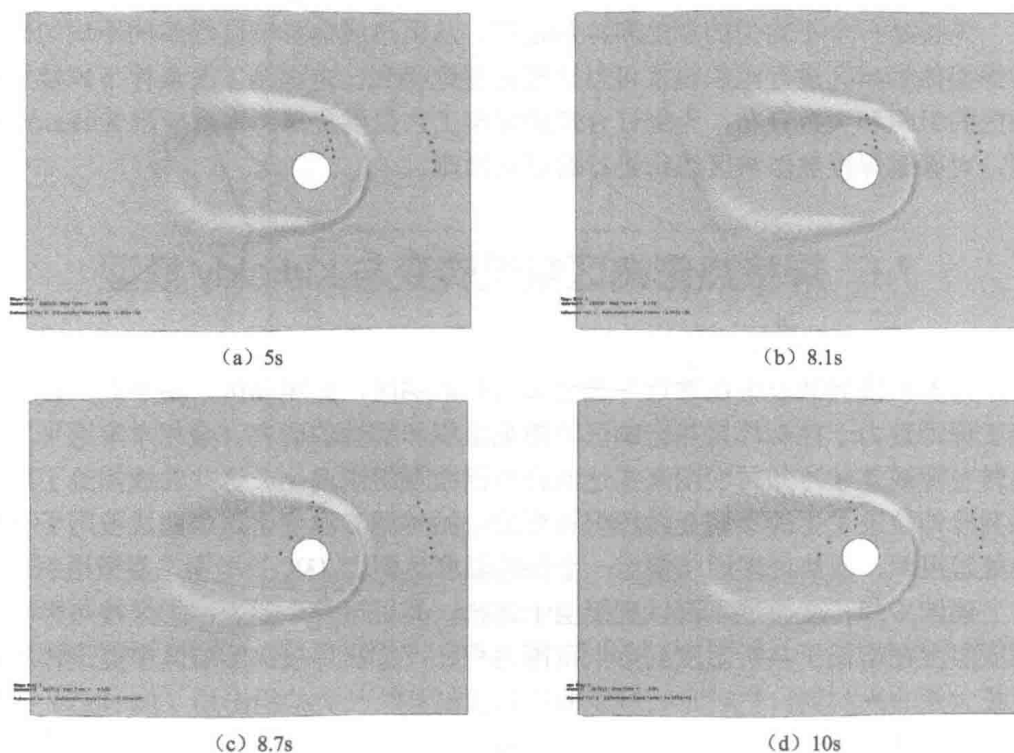


图 6-28 不同时刻追踪粒子所处位置

通过追踪粒子的观测，可以清楚地观察到材料质点的流动及绕行轨迹，为搅拌摩擦焊研究提供了直观的借鉴。

## 第 7 章

# 焊接热影响区组织模拟

焊接是一个不均匀的加热和冷却过程，从而造成热影响区组织的不均匀性。对焊接热影响区进行组织模拟可以比较方便地得到一定焊接工艺条件下焊接热影响区的组织和大致分布，为制订合理的焊接工艺提供支撑。本章应用 Kirkaldy 模型，对碳钢焊接热影响区组织进行有限元预测。

### 7.1 焊接热影响区组织转变与 Kirkaldy 模型

许多焊接失效发生在靠近焊缝金属的热影响区，如粗晶区。鉴于此，许多焊接工程师致力于控制焊接热影响区的微观组织和韧性的研究。金相学家通常用等温转变图或连续冷却转变图来描述低合金钢微观组织演化。这些曲线描绘了随一系列冷却轨迹发生的不同显微组织转变的起始时间和温度。这些曲线被用于分析热处理组织，而热处理通常假定一个保温温度达到 1173K 的平衡态显微组织。

连续冷却转变模型不可以直接用于焊接，有以下几个原因：①焊接热影响区峰值温度在略低于共析温度到熔点范围内变化；②在焊接热影响区中奥氏体相晶粒长大是非均匀的，它对时间温度曲线和抑制晶粒长大的析出相（如 NbC）的存在十分敏感；③连续冷却转变图不能方便地用于数值模拟模型。

基于这些原因，由 Kirkaldy 开发了一套相变模型，该模型后经 Watt 和 Henwood 扩展并用于低合金钢焊接热影响区组织的数值模拟。该模型的输入数据是基体金属组成、原始微观组织和有限元计算的瞬态温度。输出数据是每个积分点  $(x,y,z,t)$  的铁素体、珠光体、奥氏体、贝氏体、马氏体的体积分数及奥氏体晶粒的尺寸。

典型亚共析钢焊接热影响区相变示意图如图 7-1 所示。

由图 7-1 可见，一个典型的热影响区固态相变包括焊接加热过程的相变和冷却过程的相变两大部分。由于焊接加热的特点，焊接加热过程中的相变往往发生

得很快，因此动力学影响可以忽略不计，即假定为局部平衡状态。实际上，过热也可以忽略不计。在完全奥氏体化之后，奥氏体晶粒开始长大。晶粒长大持续到进入冷却阶段至  $A_3$  温度，此时奥氏体开始发生分解，可能的分解产物有铁素体、珠光体和贝氏体。最后，如果在马氏体起始温度时，依然存在奥氏体，那么奥氏体将按照 Koisten 和 Marburger 提出的代数方程转变为马氏体。

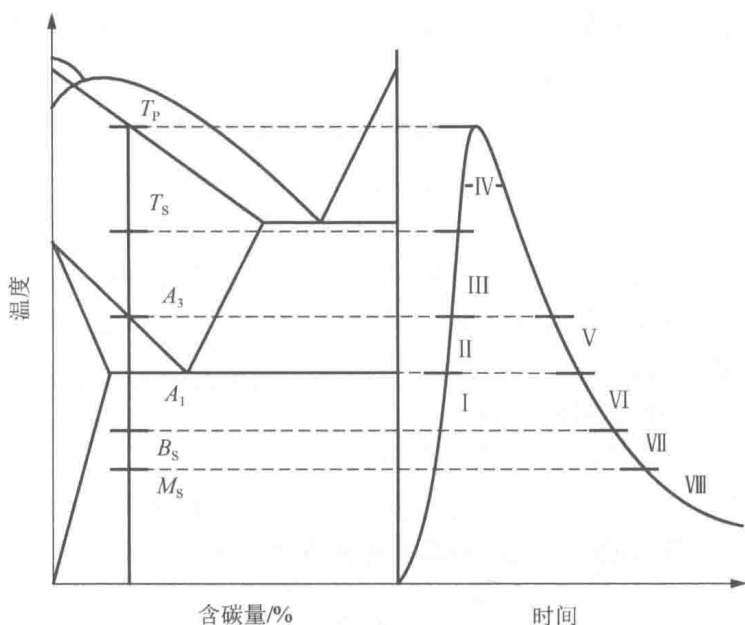


图 7-1 典型亚共析钢焊接热影响区相变示意图

- I—平衡状态下的铁素体和珠光体；II—铁素体和珠光体转变为奥氏体；
- III—奥氏体晶粒长大受 NbC 和 VC 的抑制；IV—奥氏体晶粒开始长大；
- V—奥氏体分解为铁素体；VI—奥氏体分解为珠光体；VII—奥氏体分解为贝氏体；VIII—奥氏体分解为马氏体

由此可见，在相变的数值模拟中，首先应确定各阶段相变特征温度线： $A_1$ 、 $A_3$ 、 $B_s$  和  $M_s$ 。在焊接过程中，常用  $A_{e1}$  和  $A_{e3}$  来代替冷却过程中的  $A_1$  线和  $A_3$  线。对于大部分低碳钢与低合金钢，上述关键温度线可通过合金成分来估算：

$$A_{e3}(\text{K}) = 1185 - 203\sqrt{w_C} - 15.2w_{Ni} + 44.7w_{Si} + 104w_V + 31.5w_{Mo} + 13.1w_W - 30w_{Mn} - 11w_{Cr} - 20w_{Cu} + 700w_P + 400w_{Al} + 120w_{As} + 400w_{Ti} \quad (7-1)$$

$$A_{e1}(\text{K}) = 996 - 10.7w_{Mn} - 16.9w_{Ni} + 29w_{Si} + 16.9w_{Cr} + 290w_{As} + 6.4w_W \quad (7-2)$$

$$B_s(\text{K}) = 929 - 58w_C - 35w_{Mn} - 75w_{Si} - 15w_{Ni} - 34w_{Cr} - 41w_{Mo} \quad (7-3)$$

$$M_s(\text{K}) = 834 - 474w_C - 35w_{Mn} - 17w_{Ni} - 17w_{Cr} - 21w_{Mo} \quad (7-4)$$

式中， $w$ ——各元素在合金中的质量分数。

加温阶段奥氏体的形成量可以利用杠杆定律求解。

$$V_F = \frac{w_C - w_{C_\gamma}}{w_{C_\alpha} - w_{C_\gamma}} \quad (7-5)$$

$$V_A = 1 - V_F \quad (7-6)$$

式中,  $V_A$ 、 $V_F$ ——奥氏体和铁素体的体积分数;

$w_C$ ——钢中碳的质量分数;

$w_{C_\gamma}$ 、 $w_{C_\alpha}$ ——奥氏体和铁素体中碳的质量分数,可分别由式(7-7)和式(7-8)

进行求解。

$$w_{C_\alpha} = 0.105 - 115.0 \times 10^{-6} \times T(T - 273) \quad (7-7)$$

$$w_{C_\gamma} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2 - T + 273)^2}{203^2} \quad (7-8)$$

$$\varphi_1 = 910 - 15.2w_{Ni} + 44.7w_{Si} + 104w_V + 315w_{Mo} + 13.1w_W \quad (7-9)$$

$$\varphi_2 = 30w_{Mn} + 11w_{Cr} + 20w_{Cu} - 700w_P - 400w_{Al} - 120w_{As} - 400w_{Ti} \quad (7-10)$$

式中,  $T$ ——热力学温标;

$w$ ——各元素的质量分数;

$\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ ——虚拟代号,没有实际含义。

在加热阶段会发生奥氏体晶粒的长大,假设奥氏体晶粒长大受扩散控制,晶粒长大驱动力为界面能的降低,不需要形核过程,则奥氏体晶粒长大速度方程为

$$\frac{dg}{dt} = \frac{k}{2g} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (7-11)$$

式中,  $g$ ——晶粒尺寸;

$k$ ——晶粒长大常数;

$Q$ ——晶粒长大激活能;

$R$ ——摩尔气体常数;

$T$ ——热力学温度;

$t$ ——时间。

在冷却阶段,将发生奥氏体向各子相的相变。假设转变开始前奥氏体所占体积分数为  $x$ , 则各相变微分方程表示如下。

### 1. 铁素体相变方程

奥氏体转变为铁素体的常微分方程为

$$\frac{dx}{dt} = \frac{2^{\frac{G-1}{2}} (\Delta T)^3 \exp\left(-\frac{23500}{RT}\right)}{59.6w_{Mn} + 1.45w_{Ni} + 67.7w_{Cr} + 24.4w_{Mo}} x^{\frac{2(1-x)}{3}} (1-x)^{\frac{2x}{3}} \quad (7-12)$$

式中,  $G$ ——奥氏体晶粒度, 采用美国材料与试验学会 (ASTM) 标准规定;

$\Delta T$ ——奥氏体转变为铁素体的过冷度,  $\Delta T = A_3 - T$ ;

$R$ ——摩尔气体常数;

$T$ ——热力学温度;

$t$ ——时间。

式 (7-12) 中  $2^{\frac{G-1}{2}}$  反映了铁素体在奥氏体晶界处形核, 其晶核密度是一个关于奥氏体晶界面积的函数;  $(\Delta T)^3$  为实验测得的铁素体增长率为过冷度的三次方, 这是由于奥氏体和铁素体在过冷条件下, 自由能的增加不同;  $e$  指数项反映了碳在铁中的扩散系数随温度降低; 分母反映了合金元素对扩散的影响; 最后一项是 Predator-Prey 系数, 表征铁素体的产率是已存在铁素体的体积分数  $x$  与残存奥氏体的体积分数  $(1-x)$  的函数。

$$x = \frac{x_F}{x_{FE}} \quad (7-13)$$

式中,  $x_F$ ——形成铁素体的体积分数;

$x_{FE}$ ——平衡状态下铁素体的体积分数。

## 2. 珠光体相变方程

相似地, Kirkaldy 提出的奥氏体分解为珠光体的常微分方程为

$$\frac{dx}{dt} = \frac{2^{\frac{(G-1)}{2}} (\Delta T)^3 D}{1.79 + 5.42(w_{Cr} + w_{Mo} + 4w_{MoNi})} x^{\frac{2(1-x)}{3}} (1-x)^{\frac{2x}{3}} \quad (7-14)$$

式中,  $\Delta T$ ——奥氏体转变为珠光体的过冷度,  $\Delta T = A_1 - T$ ;

$D$ ——扩散系数, 由如下关系式给出:

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{\exp\left(-\frac{27500}{RT}\right)} + \frac{0.01w_{Cr} + 0.52w_{Mo}}{\exp\left(-\frac{3700}{RT}\right)} \quad (7-15)$$

$$x = \frac{x_p}{x_{PE}} \quad (7-16)$$

式中,  $x_p$ ——形成珠光体的体积分数;

$x_{PE}$ ——平衡状态下珠光体的体积分数。

## 3. 贝氏体相变方程

根据 Kirkaldy 的理论, 奥氏体分解为贝氏体的常微分方程为



$$\frac{dx}{dt} = \frac{2^{\frac{(1-G)}{2}} (\Delta T)^2 \exp\left(-\frac{27500}{RT}\right)}{10^{-4}(2.34 + 10.1w_C + 3.8w_{Cr} + 19w_{Mo})z} x^{\frac{2(1-x)}{3}} (1-x)^{\frac{2x}{3}} \quad (7-17)$$

式中,  $x$ ——形成贝氏体的体积分数;

$\Delta T$ ——过冷度,  $\Delta T = B_s - T$ 。

系数  $z$  由如下关系式给出:

$$z = \exp[x^2(1.9w_C + 2.5w_{Mn} + 9w_{Ni} + 1.7w_{Cr} + 4w_{Mo} - 2.6)] \quad (7-18)$$

且如果式  $(1.9w_C + 2.5w_{Mn} + 9w_{Ni} + 1.7w_{Cr} + 4w_{Mo} - 2.6) < 0$ , 则  $z$  的值设为 1.0。

为方便进行编程计算, 上述奥氏体分解为子相 (铁素体、珠光体和贝氏体) 的扩散型相变微分方程可统一写成如下形式:

$$X = F_i^G F_i^C F_i^T F_i^X \quad (7-19)$$

式中,  $F_i^G$ ——奥氏体晶粒尺寸的影响;

$F_i^C$ ——化学成分的影响;

$F_i^T$ ——温度的影响;

$F_i^X$ ——当前已形成相含量的影响。

#### 4. 马氏体相变方程

马氏体相变为非扩展型相变, 参考 Koistenen 和 Marburger<sup>[36]</sup> 的文章得出如下关系式:

$$x_M = 1 - \exp[-k_1(M_s - T)] \quad (7-20)$$

式中,  $x_M$ ——形成马氏体的体积分数;

$M_s$ ——马氏体转变开始温度;

$T$ ——瞬时温度;

$k_1$ ——常数, 对于绝大多数钢种, 取值为 0.011。

以上为冷却阶段模型, 由于忽略了凝固过程的影响, 此相变模型并不适用于焊缝金属。

## 7.2 低合金钢焊接热影响区组织演变模拟实例

### 7.2.1 问题描述

手工堆焊 45 钢平板 (200mm×150mm×10mm)。手弧焊接工艺: 焊接电流 200A,

电压 18V，焊接速度 3mm/s，热效率取 0.8。

## 7.2.2 问题分析与思路

要模拟相变问题，首先要有焊接温度场。因此，在本例中，首先要计算焊接瞬态温度场，热源模型可选用双椭球形热源模型。在得到温度场的同时，借助于 UMATHT 子程序，即用户自定义材料热行为子程序，将待求各相含量设为状态变量，依据上述相变微分方程在各增量步内对其进行积分计算，在增量步的结尾对状态变量进行更新，最终得到各积分点的相的组成成分。

## 7.2.3 子程序编制要点

Abaqus 中用户自定义材料热行为子程序 UMATHT 接口如下：

```

SUBROUTINE UMATHT (U, DUDT, DUDG, FLUX, DFDT, DFDG,
1 STATEV, TEMP, DTEMP, DTEMDX, TIME, DTIME, PREDEF, DPRED,
2 CMNAME, NTGRD, NSTATV, PROPS, NPROPS, COORDS, PNEWDT,
3 NOEL, NPT, LAYER, KSPT, KSTEP, KINC)
C
    INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
    CHARACTER*80 CMNAME
    DIMENSION DUDG (NTGRD), FLUX (NTGRD), DFDT (NTGRD),
1 DFDG (NTGRD, NTGRD), STATEV (NSTATV), DTEMDX (NTGRD),
2 TIME (2), PREDEF (1), DPRED (1), PROPS (NPROPS), COORDS (3)

```

在本例中，UMATHT 子程序主要具有两方面的功能。一是为保证焊接温度场的计算顺利完成，而对材料热物性（如热导率、比热容等）进行指定；二是完成各状态变量，即各相含量的积分运算及状态变量的更新。这里主要针对 UMATHT 子程序第二方面的功能进行描述，其计算流程如图 7-2 所示。

UMATHT 子程序首先要进行必要的初始化设定和参数的赋值。该子程序的输入数据包括待焊材料化学成分、原始组织体积分数及初始晶粒尺寸，经过子程序的运算输出任意点、任意时刻  $P(x, y, z, t)$  的奥氏体及其可能的转变产物——铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体的体积分数。其中，可将奥氏体、铁素体、珠光体、贝氏体、马氏体的体积分数分别定义为状态变量 SDV1~SDV5，以方便进行结果的显示与后处理。此外，还要根据钢材初始化学成分，按式 (7-1)~式 (7-4) 进行各相变关键温度线的计算，为相变计算提供必要条件。

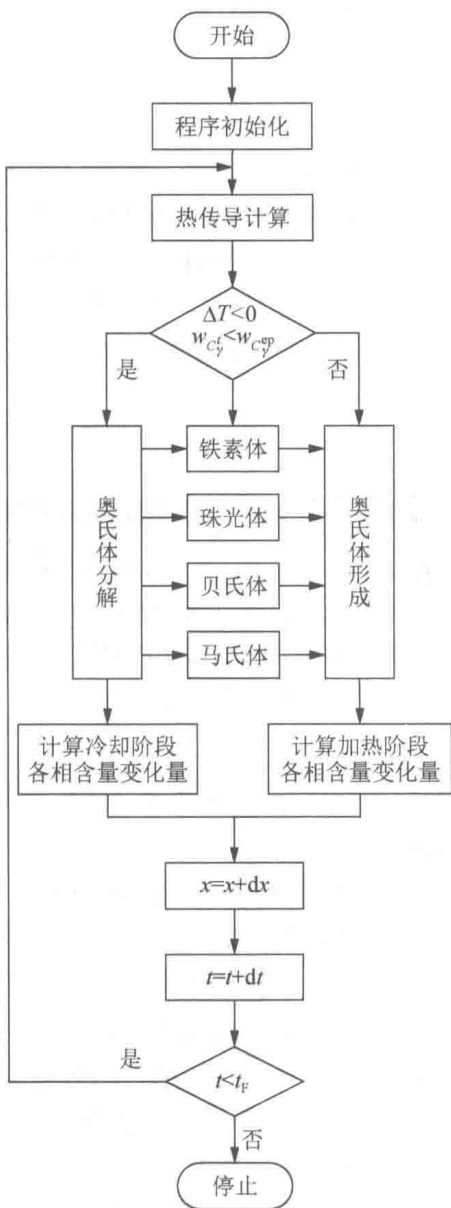


图 7-2 UMATHT 子程序相变计算流程图<sup>[64]</sup>

程序运行开始，先取得当前时刻  $t_i$  积分点的温度 TEMP，根据  $t_i$  时刻奥氏体含碳量  $w_{C_{\gamma}^t}$  与平衡态奥氏体含碳量  $w_{C_{\gamma}^{sp}}$  的相对大小判断将发生奥氏体形成过程还是分解过程。奥氏体含碳量与平衡态奥氏体含碳量的相对大小和相变特征温度线将焊接热影响区相变过程分为 8 个区域。当  $w_{C_{\gamma}^t} < w_{C_{\gamma}^{sp}}$  时，处于焊接加热阶段；当

$T < A_{e1}$  时, 不发生相变; 当  $A_{e1} < T < A_{e3}$  时, 发生奥氏体化过程, 奥氏体将逐渐形成, 并且奥氏体晶粒将不断长大; 当  $T > A_{e3}$  时, 组织完全奥氏体化。在加热阶段, 可采用杠杆定律求解奥氏体形成阶段组织的体积分数, 采用晶粒长大动力学方程计算奥氏体晶粒尺寸变化; 在冷却阶段,  $w_{C\gamma} > w_{C\gamma}^{cs}$ , 奥氏体不断分解为相应的子相: 当  $A_{e1} < T < A_{e3}$  时, 发生铁素体相变; 当  $B_S < T < A_{e1}$  时, 发生珠光体相变; 当  $M_S < T < B_S$  时, 发生贝氏体相变; 当  $T < M_S$  时, 发生马氏体相变。冷却阶段采用 Kirkaldy 模型确定扩散型相变进行的速度, 并计算  $\Delta t_i$  时间间隔内相变进行的程度, 即得出该步长终了时刻工件各处各组织的体积分数  $x_i$ , 利用 Koistinen-Marburger 模型计算温度  $T_i$  时的马氏体体积分数。此后进行下一时间步长  $\Delta t_{i+1}$  的计算, 重复下一增量步循环, 直至计算到设定时刻  $t_F$ 。

## 7.2.4 焊接热影响区相变模拟具体过程

### 1. 建立几何模型

根据实验工件的几何尺寸建立三维可变形实体几何模型。因为对称关系, 只需建立 1/2 的工件模型, 尺寸为  $200\text{mm} \times 75\text{mm} \times 10\text{mm}$ , 建立的实体几何模型如图 7-3 所示。

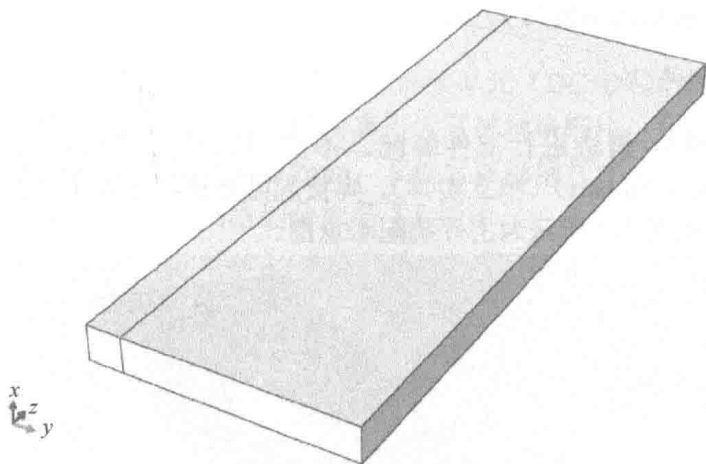


图 7-3 实体几何模型

### 2. 设定材料的热物理性能参数

材料的热物理性能参数主要包括密度  $\rho$ 、比热容  $c$ 、导热系数  $\lambda$ 、热膨胀系数  $\alpha$  等, 45 钢的热物理性能参数见表 7-1。在焊接瞬态温度场分析过程中, 材料的热物理性能

参数随温度呈非线性变化，其他温度下的热物理性能参数值通过线性插值得到。

表 7-1 45 钢的热物理性能参数

温度/K	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	比热容/[kJ/(kg·K)]	导热系数/[W/(m·K)]	热膨胀系数/(10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )
293	7872	0.462	44.55	3.60
373	7866	0.481	42.59	4.51
473	7845	0.508	41.02	4.55
573	7816	0.530	38.23	5.40
673	7740	0.560	35.74	5.42
773	7733	0.605	33.20	5.78
873	7711	0.680	30.81	7.00
973	7578	0.824	29.39	8.14
1029	7552	1.360	38.38	9.20
1073	7530	0.718	25.39	10.30
1173	7510	0.615	26.13	11.39
1273	7490	0.604	25.57	12.30

另外，焊接熔池熔化时，由固态变成液态需要吸收热量；焊接熔池凝固时，由液态变成固态需要释放热量，故需要考虑相变潜热对焊接温度场的影响。假定熔化潜热等于凝固潜热，则可取 45 钢的相变潜热均为 277kJ/kg，并取其固相线温度为 1753K，液相线温度为 1793K。

### 3. 装配部件

在 Assembly 模块进行部件装配，本实例的装配体只有一个部件，选用 Dependent (mesh on part) (独立实体)，焊接起始点设在工件上表面起始点，焊接方向沿 z 轴。如图 7-4 所示为工件装配示意图。

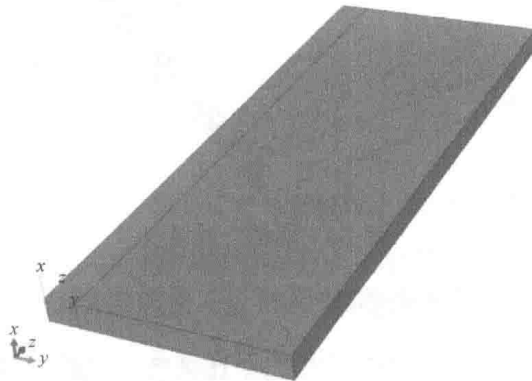


图 7-4 工件装配示意图

#### 4. 设定分析步

在 Step 模块中创建 Heat (加热) 和 Cool (冷却) 两个分析步, 自动选择时间步长, 选用 Heat transfer (热传导) 分析步进行求解计算。计算目的主要是得到焊接温度场分布和相应的相含量分布, 因此输出数据设定为 NT (节点温度) 和 SDV (状态变量), 在程序中设定 5 个状态变量, SDV1~SDV5 分别表示奥氏体、铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体的体积分数。

#### 5. 设定边界条件

本实例因为焊接操作在室内进行, 工件焊前未预热, 所以工件温度与外界环境温度相同, 为 293K。在焊接过程中, 工件与外界环境同时存在对流换热和辐射换热。

#### 6. 施加载荷

在 Load 模块中, 选择 Body heat flux (体热源), 体热源分布选择 User-defined (自定义)。在编写子程序时, 选用双椭球形功率密度分布热源对工件进行载荷施加, 此部分可参考第 4 章。

#### 7. 划分网格

Abaqus 热分析采用三维 8 节点六面体连续单元 (DC3D8), 由于在焊接过程中焊缝及近缝区温度梯度大, 在焊缝及其附近区域网格细化, 在远离焊缝的区域网格粗化, 焊缝区域网格尺寸为 0.2mm, 其他区域网格尺寸从 0.2mm 到 1mm 进行均匀过渡, 工件的有限元网格划分如图 7-5 所示。

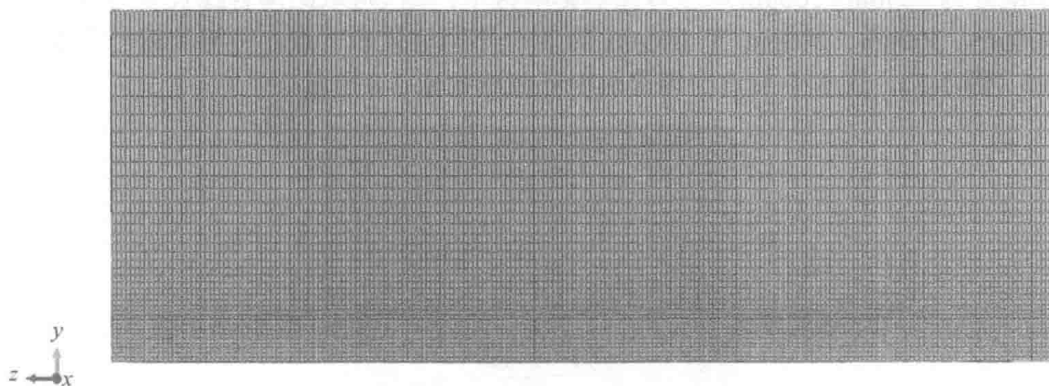


图 7-5 工件的有限元网格划分

### 8. 焊接温度场的计算机模拟结果

采用 DFLUX 子程序建立焊接热源模型，计算得到的焊接温度场云图如图 7-6 所示，图 7-6 (a) 和 (b) 分别为加热阶段 ( $t=20s$ ) 和冷却阶段 ( $t=120s$ ) 的焊接温度场云图。由图 7-6 (a) 可以看出，在双椭球形功率密度体热源作用下，焊接温度场前端与后端之间存在一定的温度梯度，前端温度梯度大于后端；由图 7-6 (b) 可以看出，散热过程中，工件中心部位与边缘部位也存在一定的温差，后焊部位较先焊部位温度高。

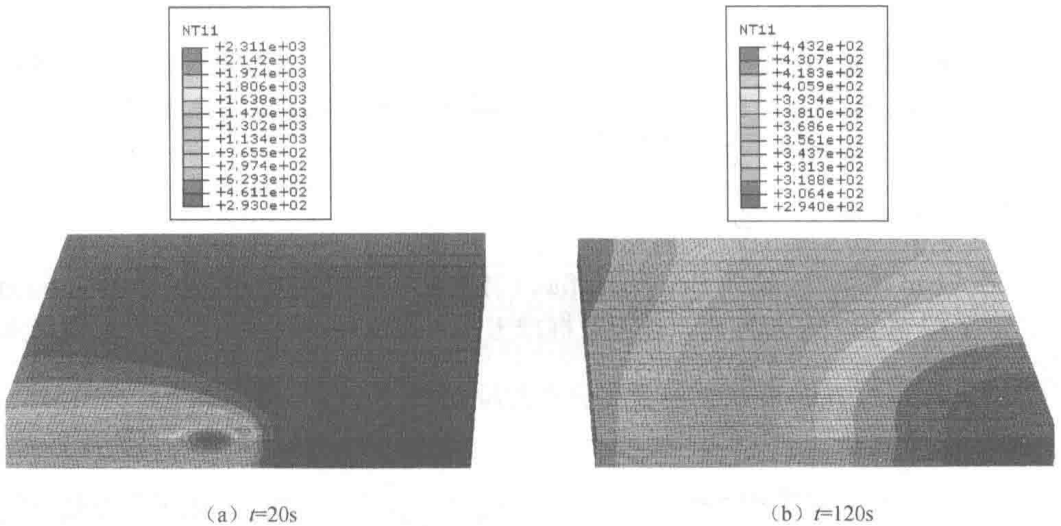


图 7-6 焊接温度场云图

为了兼顾计算速度与计算精度，将有限元模型中焊缝及近焊缝区域的网格大小细分为  $0.2mm$  ( $200\mu m$ )。在焊接热影响区中，依次选取距熔合线长度为  $500\mu m$ 、 $400\mu m$ 、 $300\mu m$ 、 $200\mu m$  和  $100\mu m$  的 5 个不同位置的节点，并将其编号为 N1~N5 (图 7-7)，这 5 个节点的焊接热循环曲线如图 7-8 所示。

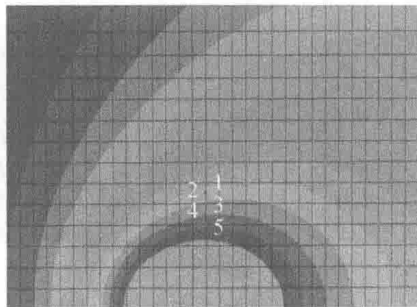


图 7-7 焊接热影响区内有限元单元节点选取

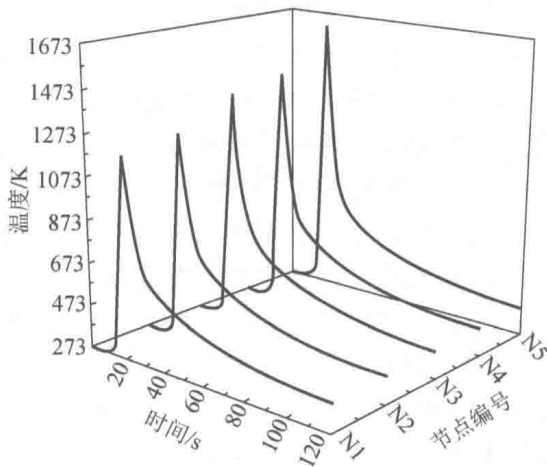


图 7-8 焊接热影响区内 5 个有限元节点的热循环曲线

由图 7-8 可以看出, N1~N5 所经历的峰值温度均高于 45 钢  $A_{c1}$  温度线, 而低于熔点 (1623K), 因此均属于焊接热影响区, 可选取感兴趣的位置对其相变过程进行分析。

### 9. 焊接热影响区固态相变模拟结果

通过焊接温度场和焊接热影响区组织相变的耦合, 实现焊接热影响区组织预测, 由 UMATHT 子程序计算输出 45 钢在焊接过程中任意瞬态各组织的体积分数分布。如图 7-9 所示为 45 钢 HAZ 内任意一点瞬态显微组织的体积分数变化曲线。

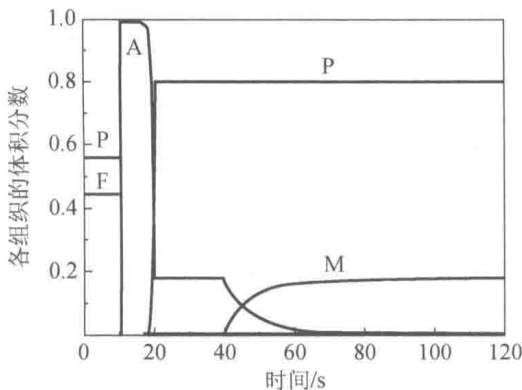


图 7-9 45 钢 HAZ 内任意一点瞬态显微组织的体积分数变化曲线

A—奥氏体; F—铁素体; P—珠光体; M—马氏体

由图 7-9 可以看出, 45 钢室温组织分别为 44%铁素体+56%珠光体, 当焊接加热阶段温度  $T$  在室温至  $A_{c1}$  之间时, 铁素体和珠光体体积分数随时间变化曲线保



持为一段平台；当  $A_{e1} < T < A_{e3}$  时，铁素体和珠光体开始发生转变并形成奥氏体，表现为铁素体和珠光体体积分数曲线急剧下降，奥氏体体积分数曲线逐渐上升；当  $T > A_{e3}$  时，组织为 100% 奥氏体，铁素体和珠光体的体积分数减小到 0。此后，随温度  $T$  继续上升至峰值温度  $T_{peak}$ ，再由峰值温度  $T_{peak}$  降至  $A_{e3}$ ，材料组织不再发生变化，并在很短的时间内，奥氏体体积分数曲线保持为平台。

在焊接冷却阶段，当温度  $T$  降至铁素体相变临界温度  $A_{e3}$  时，奥氏体开始转变为铁素体，直至温度  $T$  降到珠光体相变临界温度  $A_{e1}$  时，铁素体相变终止，剩余奥氏体开始转变为珠光体，当温度降到贝氏体相变临界温度  $B_S$  时，剩余奥氏体开始转变为贝氏体，当温度  $T$  降到马氏体相变临界温度  $M_S$  时，贝氏体转变终止。此后当温度  $T < M_S$  时，剩余奥氏体开始转变为马氏体。从图 7-9 中可以清楚地看出，冷却阶段相变的 4 个转变过程，奥氏体体积分数曲线多次不等值下降，相应子相——铁素体、珠光体及马氏体的体积分数曲线有不同程度的上升。

由图 7-9 还可看出，45 钢的最终相变产物为 0.6% 铁素体 + 79% 珠光体 + 20.4% 马氏体。对于 45 钢，铁素体相变区间较窄，珠光体相变区间和马氏体相变区间较宽，故过冷奥氏体向铁素体组织转变量较小而向珠光体和马氏体组织转变量较大，材料具有一定的淬硬性，焊接前进行预热是必要的。

## 第 8 章

# 焊接电弧及熔池的流体力学模拟

焊接电弧本质上属于一种热等离子体，在焊接力场作用下，在电极与工件之间流动；而焊接熔池内的液态金属同样在多种力的作用下发生着剧烈的流动。在某些假设条件下，二者均可视为一种导电的磁流体，在流体力学范畴内求解。本章借助流体力学软件 Fluent，通过具体实例对焊接电弧及熔池液态金属的温度场及流动行为进行模拟分析。

### 8.1 焊接电弧的流体力学模拟

#### 8.1.1 电弧等离子体的特点与基本假设

前已述及，焊接电弧的形成和维持是由中性气体原子不断被激发、电离及阴极电子发射的结果，电弧空间充斥着运动的中性气体原子、正离子和电子。在焊接电弧的流体力学模拟中，为简化计算，常做如下假设<sup>[65-69]</sup>。

- 1) 焊接电弧等离子体处于局部热平衡状态，即电子和重离子的温度相等。
- 2) 焊接电弧气体是大气压力下的氩气。
- 3) 焊接电弧是光学薄的。
- 4) 黏性效应导致的热损失忽略不计。
- 5) 不考虑电极鞘层的影响。

流体的流动状态分层流与紊流两种。流体质点做有条不紊的、有规则的运动，质点之间在流动过程中不互相混掺，这种形态称为层流；相反地，质点做不规则运动且互相混掺，轨迹无规律、十分混乱的形态称为紊流。紊流的传递速率远大于层流。从层流到紊流的转变与雷诺数息息相关。雷诺数的表达式为

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (8-1)$$

式中,  $\rho$ ——流体的密度;

$v$ ——表征速度;

$\mu$ ——流体的动力黏度系数;

$L$ ——表征长度。

在常规 TIG 焊、MIG 焊焊接中选用氩气作为保护气体, 温度在 20000 K 时电弧等离子体的表征长度  $L \approx 0.01\text{m}$ , 表征速度  $v \approx 200\text{m/s}$ , 与此同时电弧等离子体的密度  $\rho \approx 0.014\text{kg/m}^3$ , 动力黏度系数  $\mu = 2 \times 10^{-5}\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。经过计算得出, 电弧等离子体的雷诺数约为 1400, 这一数值在一般情况下被认为是层流, 所以可以认定常规 TIG、MIG 电弧的流动状态为层流。

### 8.1.2 电弧控制方程

作为一种导电的磁流体, 在流体力学数值计算过程中, 除应求解连续性方程、动量方程与能量方程外, 还需要以 UDS 的形式引用电场及磁场变量, 并进行求解。

二维轴对称模型的电弧控制方程如下。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v)}{\partial r} = 0 \quad (8-2)$$

轴向动量守恒方程:

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial z} + v \frac{\partial u}{\partial r} \right) = 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu r \frac{\partial u}{\partial r} + \mu r \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} + L F_z \quad (8-3)$$

径向动量守恒方程:

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial z} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{2\mu v}{r^2} - \frac{\partial P}{\partial r} + L F_r \quad (8-4)$$

能量守恒方程:

$$\rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial z} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \kappa r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q \quad (8-5)$$

式中,  $\rho$ ——气体密度;

$u$ 、 $v$ ——轴向和径向的速度;

$P$ ——气体压力;

$c_p$ ——定压比热容;

$T$ ——热力学温度;

$\kappa$ ——热导率;

$LF_z$ 、 $LF_r$ ——轴向和径向的洛伦兹力分量, 作为动量方程在轴向和径向的源项, 有

$$LF_z = (\vec{J} \times \vec{B})_z = j_r B \quad (8-6)$$

$$LF_r = (\vec{J} \times \vec{B})_r = -j_z B \quad (8-7)$$

其中,  $j_z$ 、 $j_r$ ——电流密度的轴向与径向分量;

$B$ ——磁感应强度。

$Q$  为能量方程的源项, 且有

$$Q = \frac{j_z^2 + j_r^2}{\sigma} + \frac{5k_B}{2e} \left( j_r \frac{\partial T}{\partial r} + j_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - S_R \quad (8-8)$$

其中,  $\sigma$ ——电导率;

$k_B$ ——Boltzmann 常数;

$e$ ——电子电量;

$S_R$ ——辐射热损失。

式 (8-8) 中 3 项分别表示焦耳热、电子焓和辐射热损失。

为求解上述电磁场物理量, 引入自定义标量电势  $V$  及轴向与径向磁矢势  $A_z$ 、 $A_r$ , 且有电流连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \sigma \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0 \quad (8-9)$$

轴向磁矢势方程:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial A_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial A_r}{\partial r} \right) = -\mu_0 j_z \quad (8-10)$$

径向磁矢势方程:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial A_r}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial A_r}{\partial r} \right) = -\mu_0 j_r + \frac{A_r}{r^2} \quad (8-11)$$

欧姆定律:

$$j_z = -\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \quad j_r = -\sigma \frac{\partial V}{\partial r} \quad (8-12)$$

安培环流定律:

$$B = \frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \quad (8-13)$$

式中,  $V$ ——电势;

$\sigma$ ——电导率;

$A_z$ 、 $A_r$ ——矢势的轴向与径向分量;

$\mu_0$ ——黏度系数。

上述方程组用于模拟层流状态下的电弧磁流体, 需要通过 UDF 编程实现, 在 8.2 节将以一个二维轴对称电弧模型为例详细介绍模拟实现的相关过程。

## 8.2 TIG 焊电弧流体力学模拟综合实例

### 8.2.1 问题描述

如图 8-1 所示为 TIG 焊电弧几何模型, 焊接电流为 100A, 保护气体流量为 4L/min, 焊丝直径为 1.5mm。试对焊接电弧温度场、流场、电磁分布进行模拟。

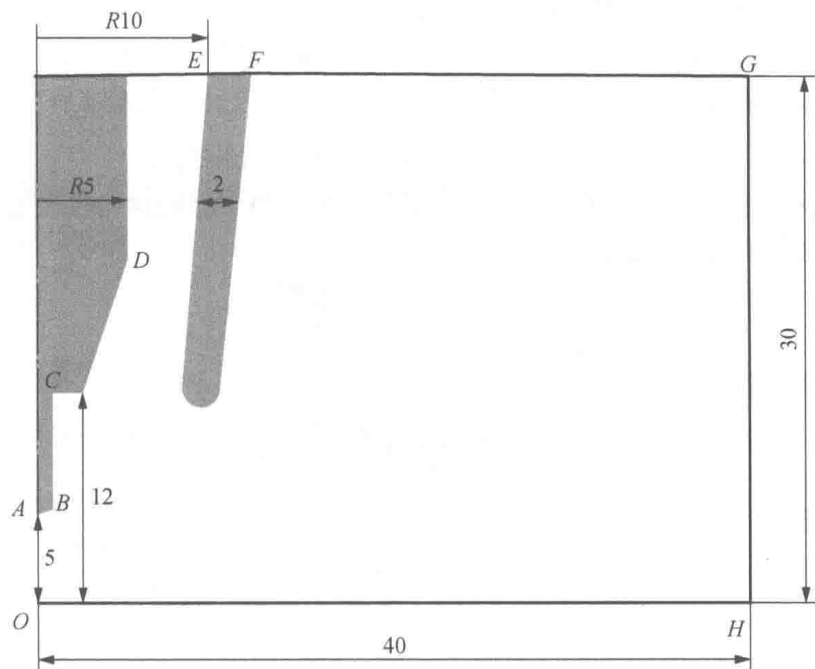


图 8-1 TIG 焊电弧几何模型

### 8.2.2 问题分析

由图 8-1 可知, 这是一个轴对称模型, 可以采用轴对称建模方式进行建模。

为简化计算，忽略电极、喷嘴及工件表面的温度变化。流体区域为纯氩气，因电弧温度较高，达到上万开尔文，因此需要给定氩气随温度变化的物理属性。电弧属于导电磁流体，需引入电场与磁场自定义标量，并通过编写 UDF 程序对相关方程源项进行设置。

### 8.2.3 TIG 焊电弧流体力学模拟过程

#### 1. 电弧区域几何模型的创建与网格划分

流体力学软件 Fluent 本身并不支持几何模型的创建与网格划分，需要使用其他如 ICEM-CFD、Hypermesh 等前处理软件进行几何模型的创建与网格划分。本实例选取 Hypermesh 作为前处理软件，采用 Hypermesh 作为 Fluent 的前处理软件时需要注意以下几点。

1) 依据 Fluent 软件的要求，如果模型为 2D 轴对称模型，则所建模型需保证  $x$  轴为对称轴，且所有单元网格均位于  $x$  轴上方。

2) 与固体区域建模不同的是，流体计算模型需划分边界网格。

3) 对每个区域及边界设定不同的集合，以方便在 Fluent 中进行相关设置。

电弧区域温度高、梯度大，需要进行较细的网格划分，以保证计算精度。TIG 电弧 2D 模型及网格划分如图 8-2 所示，共计产生 22361 个节点，22768 个单元。将划分好的网格导出并保存为 CFD-Fluent 的格式：TIGmesh.msh。

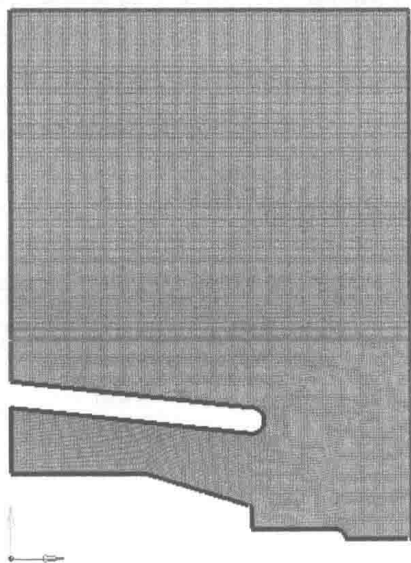


图 8-2 TIG 电弧 2D 模型及网格划分

启动 Fluent，在启动界面中选择 2D 模型，并设置工作目录，如图 8-3 所示，设置完成后单击 OK 按钮。

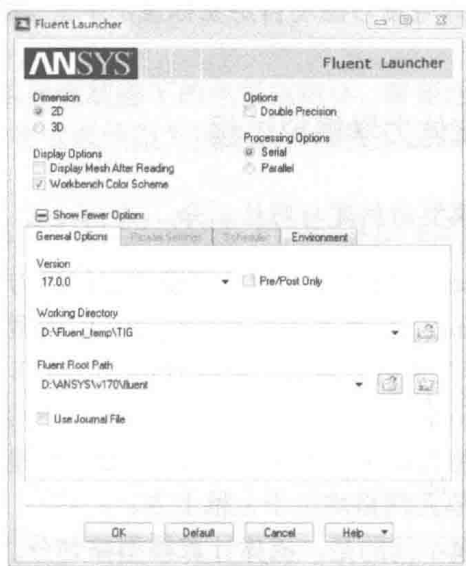


图 8-3 Fluent 启动界面

依次选择 File→Read→Mesh 命令，导入.msh 文件。在本例中导入先前建立的 TIGmesh.msh 文件。导入后网格并不是默认显示的，在 Fluent 主界面的导航栏中选择 General 选项，并在 General 任务页面单击 Scale（比例缩放）按钮对模型进行缩放。导入的网格尺寸单位默认为 m，在本例中需要改为 mm。在 Scale Mesh 对话框中勾选 Specify Scaling Factors（指定缩放因子）单选按钮，在 Scaling Factors 文本框中输入缩放系数 0.001，并单击下方的 Scale 按钮；在 View Length Unit In（显示长度单位）下拉列表中选择以 mm 为单位显示网格，如图 8-4 所示。最后单击 Close 按钮关闭 Scale Mesh 对话框。



图 8-4 网格缩放

同样，在 General 任务页面对 Solver（求解器）进行设置，选择 Time（时间模式）为 Transient（瞬态模式），选择 2D Space（二维空间模式）为 Axisymmetric（轴对称模型）。求解器设置完成后，单击 Check 按钮，检查网格模型有无问题。如果有出错信息，将在控制台显示。一般在 Hypermesh 网格划分及导入过程中会出现一定的偏差，如在本例中，控制台显示  $x$ 、 $y$  最小坐标值均小于 0（图 8-5），说明有部分网格落于  $x$  轴下方，并不符合 Fluent 对 2D 轴对称模型的要求。

```

Console
Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = -1.740830e-16, max (m) = 3.000000e-02
  y-coordinate: min (m) = -1.701332e-17, max (m) = 5.000000e-02
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 2.507488e-11
  maximum volume (m3): 1.962028e-08
  total volume (m3): 2.263663e-04
  minimum 2d volume (m3): 1.323593e-08
  maximum 2d volume (m3): 9.112633e-08
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 1.312020e-04
  maximum face area (m2): 3.487233e-04
Checking mesh.....
WARNING: left-handed faces detected on zone 4: 9 right-handed, 16 left-handed.
Info: Used modified centroid in 8 cell(s) to prevent left-handed faces.....
WARNING: Invalid axisymmetric mesh with nodes lying below the x-axis.....
  
```

图 8-5 控制台网格检查信息

根据提示信息，在控制面板输入 “>/mesh/repair-improve/repair” 可解决此问题。再次单击 Check 按钮，并确保没有出错信息。然后单击 Display（显示）按钮，在打开的 Mesh Display 对话框中保持默认设置，并单击 Display 按钮，将模型网格显示于图形窗口。

## 2. 激活相关模型

由于本例要计算电弧温度场，需要激活能量方程。在 Fluent 主界面的导航栏中选择 Model 选项下的 Energy 选项，在打开的 Energy（能量）对话框中勾选 Energy Equation（能量方程）复选框，如图 8-6 所示。

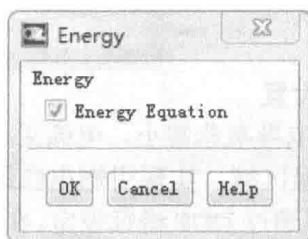


图 8-6 激活能量方程



在 Models 任务页面中保持黏性模型为 Laminar (层流) 不变, 并不用激活其他模型。

### 3. 编写并加载 UDF

UDF 采用 C 语言格式编写, 在文件开始声明包含 udf.h 头文件:

```
# include "udf.h"
```

在本例中, 主要利用 UDF 实现以下主要功能。

#### (1) 定义 UDM 与 UDS

定义 UDM, 如:

```
#define Jx C_UDMI (cell,thread,0)
```

这样, UDM-0 被定义成了  $x$  方向的电流密度  $J_x$ , 并需在后续的程序中给定。

定义 UDS, 如:

```
enum
{
    V,Ax,Ay,N_REQUIRED_UDS
};
```

采用枚举函数定义 UDS, 这样电势  $V$ 、 $x$  方向矢势  $A_x$  和  $y$  方向矢势  $A_y$  被分别定义成 UDS-0、UDS-1 和 UDS-2。

#### (2) 定义温度相关电导率

电导率的设定采用 DEFINE\_DIFFUSIVITY 宏, 如:

```
DEFINE_DIFFUSIVITY (elec_conductivity, cell, thread, i)
{
    real cond;
    if (T<=273)
        cond=0.001;
        :
}
```

#### (3) 电弧引弧 (点火) 设置

氩气在 5000K 以下时, 电导率非常小, 电弧无法引燃, 需要在开始计算前人为地在电弧区域设定一个高温区域, 实现引燃电弧的作用。这部分功能可以通过 Patch (修补) 功能实现, 也可以通过 UDF 进行设定。在 UDF 中可通过 DEFINE\_INIT 宏实现在电弧区域设定一个初始的高温 (如 15000K)。在菜单栏选择 User → Defined → Function Hooks 命令, 打开 User-Defined Function Hooks 对话框, 在此对话

框中，单击 Initialization 后面的 Edit 按钮，选择 UDF 中的点火函数，如图 8-7 所示。



图 8-7 UDF 初始化关联

#### (4) 相关源项设置

在本例中，模拟的电弧过程是一个定常过程，故无质量源项。由于电磁场的引入会产生洛伦兹力，因此需对动量方程的源项进行设定。能量方程中存在焦耳热、电子输运焓及辐射散热，因此需要对能量方程源项进行设定。上述源项可以在 UDF 中通过 DEFINE\_SOURCE 宏进行设置。编写完 UDF 后，保存并命名为 TIG\_2D.c。

在本例中，采用编译方法编译并加载 UDF。依次选择 User-Defined→Functions→Compiled 命令，打开 Compiled UDFs 对话框，单击 Source File 下的 Add 按钮，并选择先前编写的 TIG\_2D.c 源程序。在 Library Name 文本框中输入“tig\_ufd”作为编译后的库名，然后依次单击 Build 按钮和 Load 按钮完成 UDF 的编辑和加载，如图 8-8 所示。

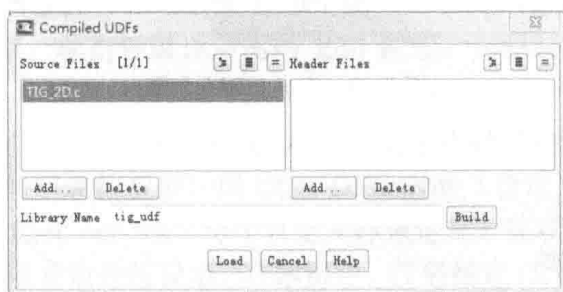


图 8-8 UDF 的编译和加载

#### 4. 设置 UDS 的个数

依次选择 User-Defined→Scalars 命令，打开 User-Defined Scalars 对话框，在 Number of User-Defined Scalars 文本框中输入“3”，共设定 3 个 UDS，即电势  $V$ 、 $x$  方向矢势  $A_x$  和  $y$  方向矢势  $A_y$ 。本例中 UDS 输运方程均无非稳态项与对流项，在 Flux Function 下拉列表与 Unsteady Function 下拉列表中选择 None 即可，如图 8-9 所示。

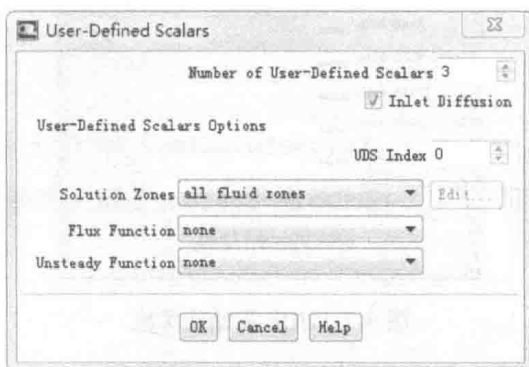


图 8-9 自定义标量设置

#### 5. 设置 UDM 的个数

在本例中共设置了 8 个 UDM，详见 UDF 相关设置。依次选择 User-Defined→Memory 命令，打开 User-Defined Memory 对话框，在 Number of User-Defined Memory Locations 文本框中输入“8”，如图 8-10 所示。

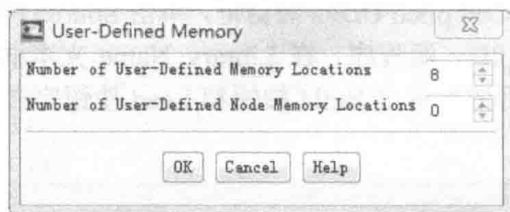


图 8-10 定义 UDM 个数

UDM 将变量存储到每个单元的中心，这些存储的变量可方便地在后处理中显示并用于分析。

#### 6. 设置材料属性

在本例中使用纯氩气作为流体材料，氩气的密度、电阻率、热导率、黏度与

温度的关系如图 8-11 所示。

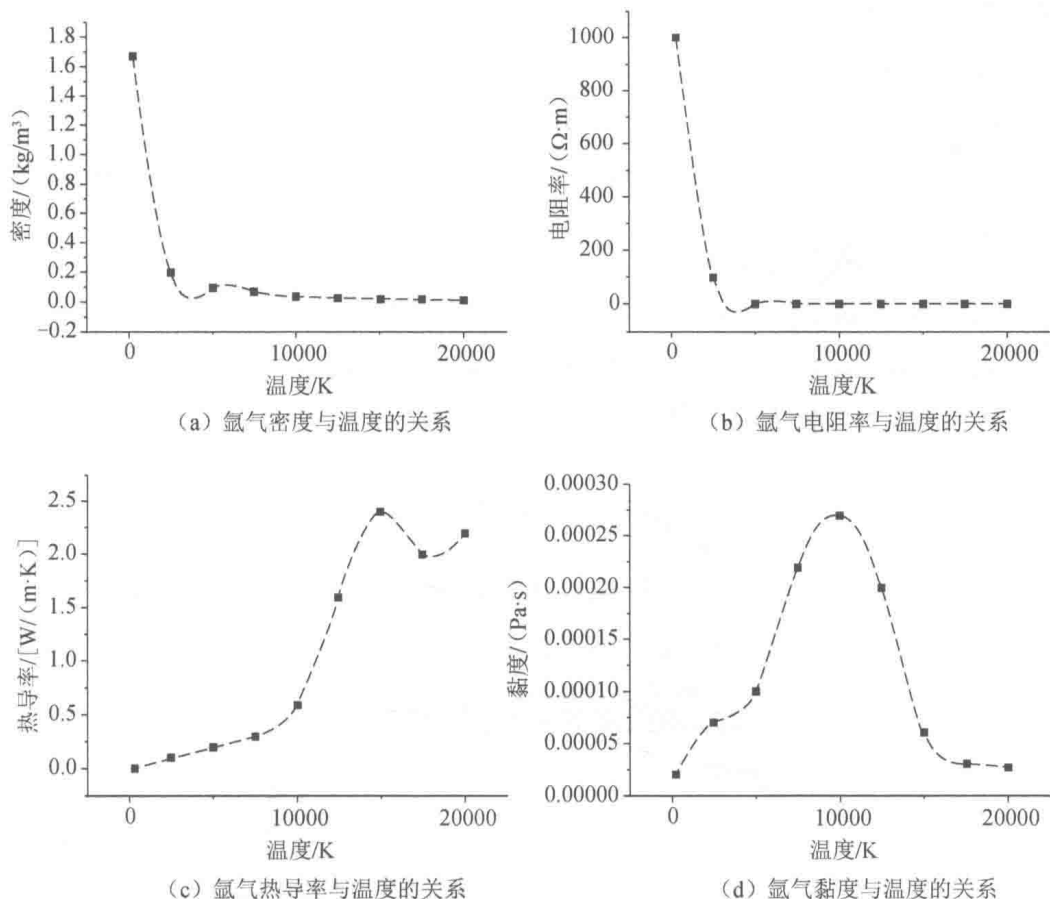


图 8-11 氩气相关属性与温度的关系

在菜单栏中单击 **Create/Edit Materials** 按钮，打开 **Create/Edit Materials** 对话框，单击 **Fluent Database** 按钮，在 **Fluent** 数据库中选择 **Ar** (氩气)，并单击 **Copy** 按钮导入氩气材料属性，可见材料数据库中氩气属性均为常温属性，并不适合电弧等离子体的计算。单击各属性后面的 **Edit** 按钮，对材料属性进行编辑，本例中采用 **piecewise-linear** (分段线性函数) 定义温度相关氩气属性，如图 8-12 所示。

对于图 8-12 中材料属性最后一项 **UDS Diffusivity** (自定义标题扩散率)，从下拉列表中选择 **Defined-per-uds** (每个自定义标量定义) 选项，单击后面的 **Edit** 按钮对各 **UDS** 的扩散系数进行设定。在本例中，仅需指定 **UDS-0**，即电势的扩散系数，也就是电导率。在 **UDS Diffusion Coefficients** (自定义标题扩散系数) 对话

框的 Coefficient 下拉列表中选择 user-defined 选项，并单击后面的 Edit 按钮，选择 UDF 中的自定义电导率函数名，如图 8-13 所示。

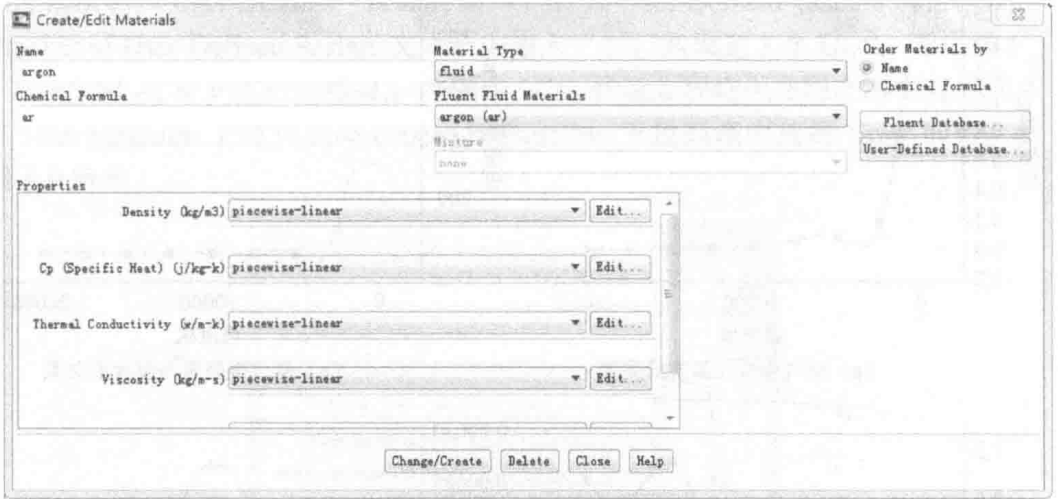


图 8-12 设置氩气属性

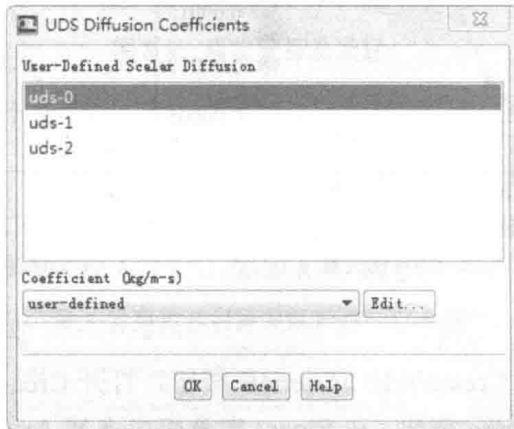


图 8-13 设置自定义标量扩散率

## 7. 设置流体域源项

在 Fluent 主界面的导航栏中选择 Cell Zone Conditions 中的 fluid 选项进行流体域设置。在打开的 Fluid 对话框中勾选 Source Terms (源项) 复选框，并单击 Source Terms 选项卡进行流体域源项指定，如图 8-14 所示。

分别对径向及轴向动量方程、能量方程，以及径向及轴向磁矢势方程进行源项指定，即指定 UDF 中相应的源项函数名，最后单击 OK 按钮完成源项指定。

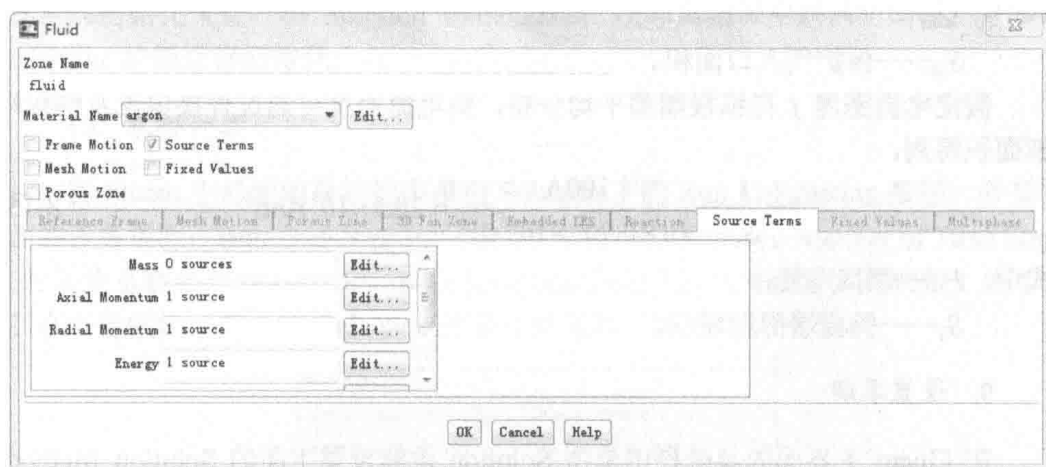


图 8-14 指定流体域源项

## 8. 设定边界条件

在 Fluent 主界面的导航栏中选择 Boundary Conditions 选项展开各边界，并对各边界条件进行设置，具体见表 8-1。

表 8-1 边界条件设置

区域	边界类型	速度/ $v$	温度/ $T$	电势/ $V$	磁矢势/ $A$
OA	axis	—	—	—	—
AB	wall	0	5000K	$\sigma \frac{\partial V}{\partial n} = j$	$\frac{\partial A}{\partial z} = 0, \frac{\partial A}{\partial r} = 0$
BCD	wall	0	1000K	$\frac{\partial V}{\partial z} = 0, \frac{\partial V}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial z} = 0, \frac{\partial A}{\partial r} = 0$
DE	velocity-inlet	0.284m/s	1000K	$\frac{\partial V}{\partial z} = 0, \frac{\partial V}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial z} = 0, \frac{\partial A}{\partial r} = 0$
EF	wall	0	1000K	$\frac{\partial V}{\partial z} = 0, \frac{\partial V}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial z} = 0, \frac{\partial A}{\partial r} = 0$
FG、GH	pressure-outlet	—	1000K	$\frac{\partial V}{\partial z} = 0, \frac{\partial V}{\partial r} = 0$	0
OH	wall	0	5000K	0	$\frac{\partial A}{\partial z} = 0, \frac{\partial A}{\partial r} = 0$

注： $\sigma$  为电导率； $j$  为电流密度； $z$  代表轴对称模型的轴线方向； $r$  为模型的径向方向。

其中，氩气入口速度  $v_{in}$  通过氩气流量及入口截面积计算得到：

$$v_{in} = \frac{Q_{Ar}}{S_{in}} = \frac{4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{\pi(0.01^2 - 0.005^2) \text{ m}^2} = 0.284 \text{ m/s} \quad (8-14)$$

式中， $Q_{Ar}$ ——氩气体积流量；  
 $S_{in}$ ——保护气入口面积。

假定电流密度  $j$  在钨极端部平均分布，则电流密度可通过焊接电流及钨极端部面积得到：

$$j = \frac{I}{S_T} = \frac{100A}{2\pi \times 0.75^2 \times 10^{-6} m^2} = 28.3 \times 10^6 A/m^2 \quad (8-15)$$

式中， $I$ ——焊接电流；  
 $S_T$ ——钨极端部表面积。

### 9. 设置求解

在 Fluent 主界面的导航栏中单击 Solution 求解设置下面的 Solution Methods 按钮，进行求解方法设置，在 Solution Methods 任务页面的 Scheme 的下拉列表中选择 SIMPLEC 算法，其余选项保持默认即可，如图 8-15 所示。在 Fluent 主界面的导航栏中单击 Solution Controls 按钮进行求解参数设置，如图 8-16 所示。

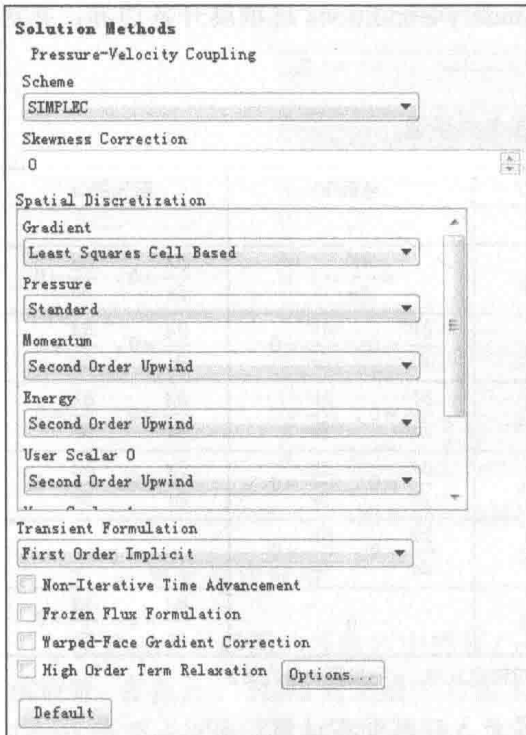


图 8-15 设置求解方法



图 8-16 设置求解参数

在 Fluent 主界面的导航栏中单击 Solution Initialization (求解初始化) 按钮进

行求解初始化设置，在 Solution Initialization 任务页面保持默认初始值，并单击 Initialize 按钮进行初始化。

## 10. 求解计算

在 Fluent 主界面的导航栏中单击 Solution 下的 Run Calculation 按钮，并在右面的任务页面，Time Step Size (s) (设定时间步长) 为 0.01，Number of Time Steps (时间步总数目) 为 1000 步，Max Iterations/Time Step (每步最大迭代数) 为 50，其余保持默认，并单击 Calculate 按钮开始运算，如图 8-17 所示。

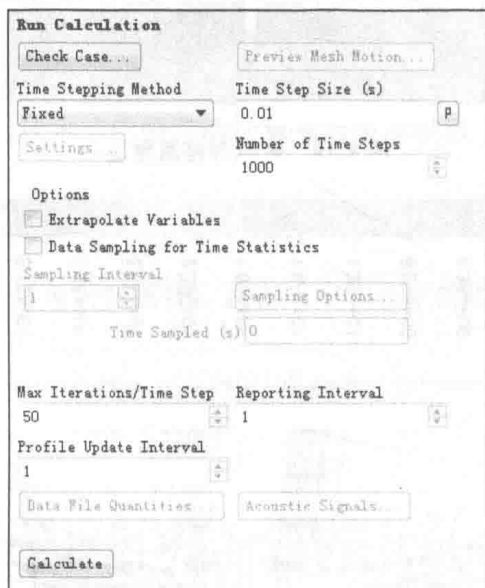


图 8-17 设置运算

## 11. 模拟计算结果

计算完成后，在 Fluent 主界面的导航栏中单击 Results 下的 Graphics 按钮，在右面的任务页面中选择 Contours 选项并单击 Set up 按钮，进行等值线云图设置。选取 Temperature (温度云图)，其他保持默认，并单击 Display 按钮显示温度场云图，如图 8-18 所示。由图 8-18 可见，电弧整体呈钟罩形分布，最高温度出现在钨极端部位置，达  $2.84 \times 10^4$  K。

电弧区域流场分布如图 8-19 所示。由图 8-19 可见，氩气保护气体从喷嘴进入，开始流速并未发生大的改变，而在进入电弧区域后速度迅速增加，与温度分布呈正比例关系，最大速度出现在最高温度区域，可达 38.3m/s。



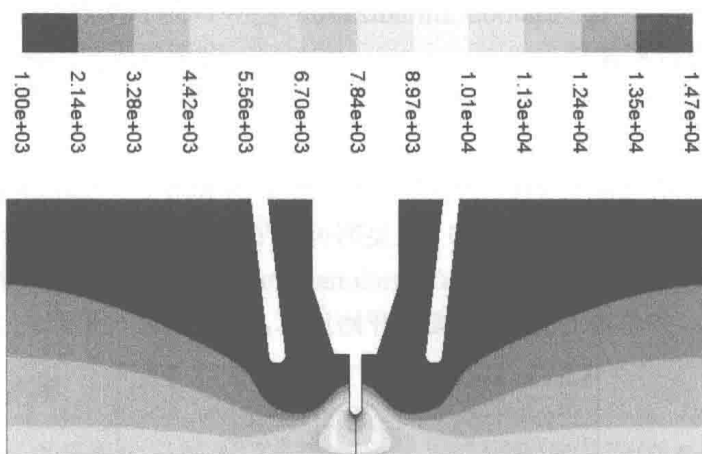


图 8-18 电弧焊接温度场

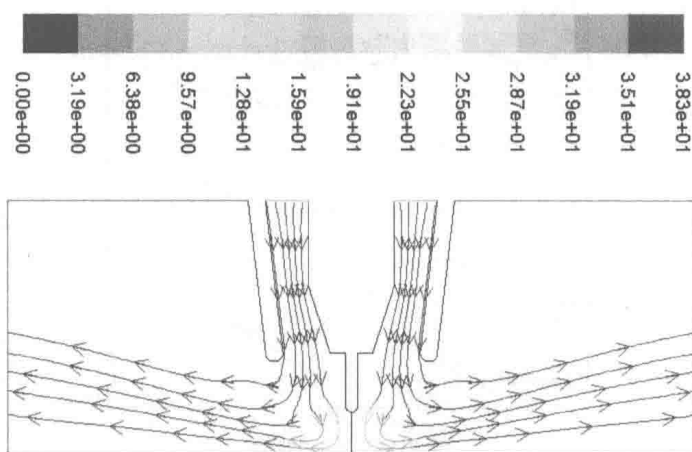


图 8-19 TIG 焊电弧区域流场分布

## 8.3 焊接熔池的流体力学模拟

### 8.3.1 焊接熔池的流体特点与基本假设

第 2 章中已经述及, 焊接熔池在多种力的作用下存在着剧烈的流动, 这对于焊接过程的传热、传质、焊缝凝固行为、焊缝最终几何形状及接头质量有着重要的影响。焊接熔池参与导电, 具有磁流体特征, 在某些基本假设的前提下, 其依

然可以在流体力学范畴内求解。为了简化计算,取如下基本假设<sup>[70-72]</sup>:

- 1) 采用 Boussinesq 近似处理熔池中的浮力。
- 2) 熔池的自由表面为平面。
- 3) 忽略金属蒸气的作用。
- 4) 不考虑 MIG 焊熔滴过渡。
- 5) 不考虑电弧对工件的压力。

另外,还需要通过雷诺数的计算来判定焊接熔池内部的流动是何种流动状态,低碳钢在 2000K 时流体的特征长度  $L \approx 0.01\text{m}$ , 流动速度  $v \approx 0.15\text{m/s}$ , 密度  $\rho = 6900\text{kg/m}^3$ , 动力黏度系数  $\mu = 0.01\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。由式 (8-1) 计算得知, 低碳钢焊接熔池的雷诺数约为 1035, 通常情况下认为内流流体由层流转变为紊流的雷诺数范围为 2000~3000, 因此本节中的熔池计算采用层流模型。

### 8.3.2 焊接熔池控制方程

焊接熔池作为一个导电的磁流体, 其在三维状态下的控制方程如下。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (8-16)$$

$x$  方向动量守恒方程:

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_x \quad (8-17)$$

$y$  方向动量守恒方程:

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_y \quad (8-18)$$

$z$  方向动量守恒方程:

$$\rho \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} + S_z \quad (8-19)$$

能量守恒方程:

$$\rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_H \quad (8-20)$$

电流连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) = 0 \quad (8-21)$$

欧姆定律:

$$J = \sigma E \quad (8-22)$$

安培环流定律:

$$B = \frac{\mu_0}{x} \int_0^x x j_y dx \quad (8-23)$$

式中,  $\rho$ ——气体密度;

$u$ 、 $v$ 、 $w$ —— $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的速度;

$\mu$ ——黏度系数;

$P$ ——气体压力;

$T$ ——热力学温度;

$c_p$ ——定压比热容;

$\kappa$ ——热导率;

$S_x$ 、 $S_y$ 、 $S_z$ ——动量方程在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的源项;

$S_H$ ——能量方程的源项, 包括所有不能归入对流项及扩散项中的其他项;

$\varphi$ ——电势;

$J$ ——电流密度矢量;

$\sigma$ ——电导率;

$E$ ——电位差;

$B$ ——磁场强度;

$j_y$ ——电流密度的  $y$  方向分量;

$\mu_0$ ——真空磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 。

## 8.4 等离子-MIG 复合焊熔池流体力学模拟实例

本节在 8.2 节电弧流体力学模拟的基础上, 以一个稍复杂的等离子-MIG 复合焊接例子<sup>[73]</sup>对熔池的流体力学模拟进行说明。

### 8.4.1 问题描述

等离子-MIG 复合焊接系统由等离子弧焊与 MIG 焊组成, 其计算区域如图 8-20 所示, 复合焊采用旁轴式设计, 等离子弧焊在焊接方向的前方, MIG 焊电

极在焊接方向的后方。等离子弧焊喷嘴孔径为 3mm，钨极内缩量为 3mm，钨极直径为 2.4mm，电极锥角为 9°。MIG 焊焊丝直径为 1.2mm，钨极轴线与焊丝轴线夹角为 25°，等离子弧焊喷嘴距工件表面的距离为 4mm。工件厚度为 12mm，材料为低碳钢 S355J2W。

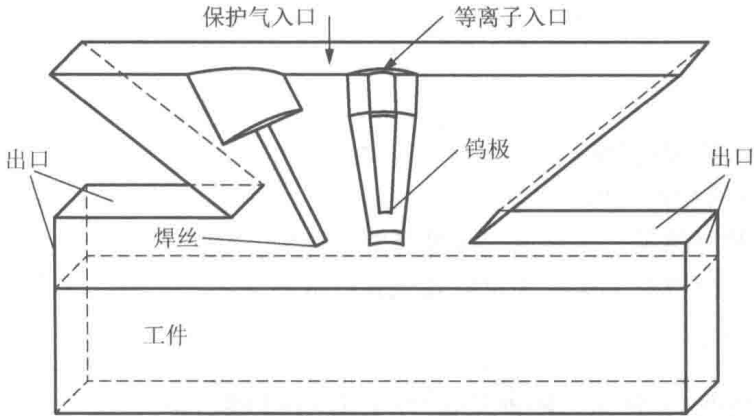


图 8-20 等离子-MIG 复合电弧-熔池统一模型

焊接参数：等离子电流 180A，MIG 电流 200A，等离子气流量 6L/min，保护气流量 28L/min，工件厚度 12mm。对焊接熔池进行流体力学计算。

### 8.4.2 问题分析

在此问题中，模型不再具有轴对称性，因此应建立三维计算模型，模型整体沿等离子弧焊钨极与 MIG 焊电极所在平面对称，可对整体模型的 1/2 进行建模。模型中包含两个计算域——流体域与固体域，需要增加熔化-凝固模型计算焊接熔池的形成。

凝固熔化模型是在设定的温度下发生凝固行为或熔化行为的模型，当温度高于设定值时，流体内部会出现流体的流动现象。软件内部采用 Enthalpy- Porosity (焓-多孔度) 功能来对流体的熔化和凝固进行模拟。运用多孔部分来表示熔化部分所占的份额，在多孔部分中完全熔化的流体区域的多孔度为 1，在固体区域的多孔度为 0，在糊状区域的多孔度为 0~1。在熔化过程中，多孔度从 0 上升至 1；而在凝固过程中，多孔度从 1 降低到 0；该模型通过在动量方程中添加源项  $S_u$  来描述糊状区域流动的状态， $S_u$  由下式给出：

$$S_u = -C \frac{(1 - f_l)^2}{f_l^3 + B} v \quad (8-24)$$

式中， $f_l$ ——液相体积分数，假定液相体积分数随温度呈线性变化，如式 (8-25)

所示；

$C$ ——一个相对比较大的数值；

$B$ ——避免除零而设定的一个比较小的数值。

$$f_1 = \begin{cases} 0, & T \leq T_s \\ \frac{T - T_s}{T_1 - T_s}, & T_s < T \leq T_1 \\ 1, & T > T_1 \end{cases} \quad (8-25)$$

式中， $T_s$ ——固相线温度；

$T_1$ ——液相线温度。

整体计算思路是，先计算三维稳态复合电弧，达到收敛后加入工件区域继续计算，得到三维稳态熔池。其中电弧计算过程与 8.2 节类似，这里主要介绍复合焊熔池模拟部分。

### 8.4.3 复合焊接电弧-熔池流体力学模拟过程

#### 1. 网格划分与导入

采用 Hypermesh 软件对复合电弧-熔池统一模型进行网格划分。针对求解域特点，在复合电弧区域存在较大的温度梯度，为获得更加精确的数值解，该区域采用较密的网格密度（最小尺寸为 0.1mm），其他区域最小尺寸为 0.3mm，工件区域最小尺寸为 0.5mm，网格类型尽可能选择六面体网格。划分的网格如图 8-21 所示。

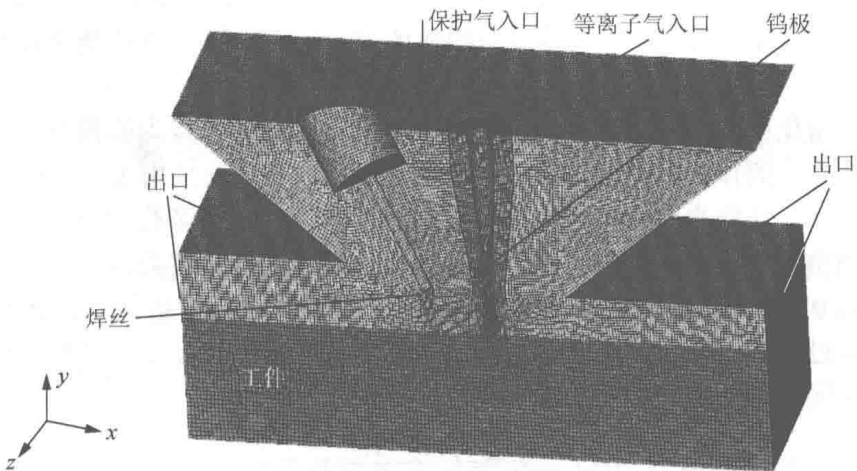


图 8-21 复合电弧-熔池统一模型网格划分

启动 Fluent, 在启动界面选择 3D 模型。导入网格后, 在导航栏中选择 General 选项, 在右面的任务页面依次单击 Check→Scale→Display 按钮进行网格的检查、缩放与显示。在 General 任务页面中保持基于 Pressure-Based (压力) 的求解器, 以及 Steady (稳态) 求解计算。考虑熔池液态金属会受到重力的影响, 需要勾选 Gravity 复选框, 对照模型图, 选择 y 轴负方向为重力方向, 并输入“-9.8”作为重力加速度, 如图 8-22 所示。

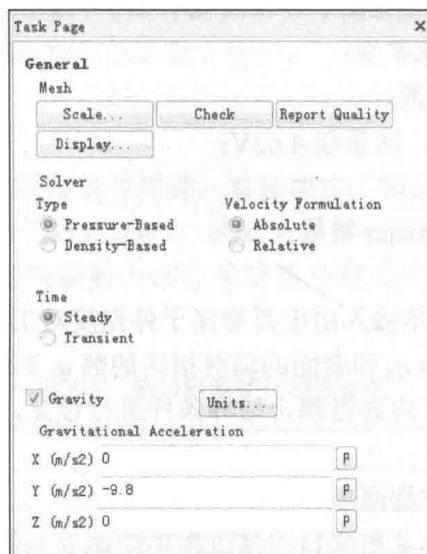


图 8-22 General 任务页面设置

## 2. 激活相关模型

在导航栏中选择 Model 选项, 进入计算模型设置。本例中, 需要计算电弧及熔池温度场, 故开启 Energy (能量) 模型。保持 Viscous (黏性) 模型为 Laminar (层流)。此外, 考虑工件在电弧热的作用下会发生熔化形成熔池, 需开启 Solidification & Melting (熔化与凝固) 模型, 如图 8-23 所示。

## 3. 熔池 UDF 方程中的源项

在本例中, 共有两个计算域、两种材料, 对于计算域求解相关运输方程的源项及部分材料属性的设置均需通过编写 UDF 程序完成。对于



图 8-23 计算模型设置

电弧等离子体,其 UDF 程序与 8.2 节中类似,只是控制方程由二维扩展到了三维,这里不再赘述。在这里,着重对熔池 UDF 中控制方程源项进行说明。

### (1) 熔池能量守恒方程源项

在焊接熔池中,由于电流密度较小,故可忽略焦耳热的影响,这样,熔池的热量将主要来源于电弧。在工件和电弧交互面上,熔池热流密度可表示为

$$q_a = q_c + q_e + q_r = -k \frac{\partial T}{\partial y} + |j_y| \varphi_a - \varepsilon_r k_B T^4 \quad (8-26)$$

式中,  $j_y$ —— $y$  方向的电流密度;

$k$ ——界面热传导系数;

$\varphi_a$ ——阳极功函数,这里取 4.65V;

$\varepsilon_r$ ——发射率;

$k_B$ ——Stefan-Boltzmann 常数;

$T$ ——热力学温度。

式(8-26)表示工件热输入由电弧等离子体温度对工件表面形成的热传导  $q_c$ 、电子进入工件的凝固潜热  $q_e$  和表面的辐射损失的热  $q_r$  3 部分组成。其中,电弧等离子体与工件表面热传导将通过耦合边界条件进行设置,而将  $q_e$ 、 $q_r$  两项加入熔池能量守恒方程源项中。

### (2) 熔池动量守恒方程源项

动量守恒方程的源项主要来自焊接过程中熔池受到的若干力的作用。其中,重力通过 General 任务页面进行设置(图 8-22),表面张力通过边界条件进行设置。在本例中,忽略电弧压力、等离子流拉力及熔滴冲击力,仅通过 UDF 将浮力及电磁力加入动量守恒方程源项中。

熔池液态金属在计算过程中,可认为其密度不会发生较大的变化,因此采用 Boussinesq 近似假设来处理浮力,其表达式为

$$G = -\rho_l g \beta (T - T_0) \quad (8-27)$$

式中,  $T_0$ ——参考温度,这里取工件材料熔点;

$\rho_l$ ——参考温度  $T_0$  下的液态金属的密度;

$\beta$ ——液态金属的体积膨胀系数,因为浮力只和重力方向有关,故在  $x$ 、 $z$  方向动量方程中不添加这一项,只将浮力添加在  $y$  方向的动量方程源项之中。

### (3) 电磁力

焊接熔池与电弧类似,均可以看作导电的磁流体,在焊接过程中电弧区域和熔池区域将产生自感应磁场,导电的磁流体将在焊接产生的电、磁场中受到电磁力的作用。在熔池中电磁力的大小也同样近似等于洛伦兹力,洛伦兹力以式(8-28)的

形式被添加到动量方程的源项中。其表达式为

$$LF = J \times B \quad (8-28)$$

式中,  $LF$ ——单位体积上的力;

$J$ ——电流密度矢量;

$B$ ——磁通量矢量。

$LF$  垂直于电流密度矢量和磁感应矢量。洛伦兹力在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向的分量分别为  $(J \times B)_x$ 、 $(J \times B)_y$ 、 $(J \times B)_z$ , 可结合麦克斯韦方程组给出。上述 3 个方向的洛伦兹力通过源项方式添加到相应的动量方程中。

#### 4. 工件的材料属性

工件的热物性参数选用得是否精确, 直接决定了模拟结果的准确性。本例中工件选取的材料为低碳钢 (S355J2W), 需要的材料物理参数有密度、导热系数、黏度系数、比热容等, 这些参数大部分是随温度变化的。计算中所用的参数见表 8-2。

表 8-2 低碳钢常规热物性参数

物理量	定义	数值
$T_0$	环境温度/K	300
$T_l$	液相线温度/K	1789
$T_s$	固相线温度/K	1759
$\Delta H$	熔化潜热/(J/kg)	$2.47 \times 10^5$
$\beta$	热膨胀系数/( $K^{-1}$ )	$10^{-4}$
$\partial \gamma / \partial T$	表面张力温度系数/[N/(m·K)]	$-0.43 \times 10^{-4}$
$\gamma$	表面张力系数/(N/m)	1.0
$\mu_0$	磁导率/(N/m)	$1.26 \times 10^{-6}$

其他与温度有关的热物性参数如下。

比热容:

$$c = \begin{cases} 0.51376 - 3.3504 \times 10^{-4} T + 6.8929 \times 10^{-7} T^2, & T \leq 937K \\ -10.539 + 1.17 \times 10^{-2} T, & 937K \leq T \leq 1023K \\ 11.873 - 1.0208 \times 10^{-2} T, & 1023K \leq T \leq 1100K \\ 0.644, & 1100K \leq T \leq 1379K \\ 0.35434 + 2.1 \times 10^{-4} T, & 1379K \leq T \end{cases} \quad [J / (kg \cdot K)]$$

导热系数:



$$\lambda = \begin{cases} 60.719 - 0.027857T, & T \leq 851\text{K} \\ 78.542 - 0.0488T, & 851\text{K} \leq T \leq 1082\text{K} \\ 15.192 - 0.0097T, & 1082\text{K} \leq T \leq 1768\text{K} \\ 349.99 - 0.1797T, & 1768\text{K} \leq T \leq 1798\text{K} \end{cases} \quad [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$$

黏度系数:

$$\mu = \begin{cases} 119.003 - 0.061T, & 1823\text{K} \leq T \leq 1853\text{K} \\ 10.603 - 0.025T, & 1853\text{K} \leq T \leq 1873\text{K} \\ 36.263 - 0.0132T, & 1873\text{K} \leq T \leq 1973\text{K} \end{cases} \quad [10^{-3}\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})]$$

上述随温度变化的材料属性可通过 Materials 任务页面用分段线性函数给出(如 8.2 节材料属性设置),也可通过 UDF 程序给出。在本例中为了方便起见,将通过 UDF 给出,其中比热容性能的给定通过 DEFINE\_SPECIFIC\_HEAT 宏定义,而导热系数和黏度系数均通过 DEFINE\_PROPERTY 宏定义。

## 5. 边界条件

模型的边界分为外边界和内边界,模型的外边界指的是整体计算域的外边界,而内边界指的是计算域内部两种材料或相之间的界面。

在本例中,工件的外侧表面与外界存在热交换,通过混合散热边界条件给定,如下式:

$$q_{\text{mix}} = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} = -h_c(T - T_\infty) - \varepsilon_r k_B (T^4 - T_\infty^4) \quad (8-29)$$

式中,  $h_c$ ——表面传热系数,取  $80\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ;

$\varepsilon_r$ ——发射率,取 0.4;

$k_B$ ——Stefan-Boltzmann 常数;

$T_\infty$ ——环境温度,取  $300\text{K}$ 。

式(8-29)表示工件外表面的换热条件是由对流和辐射组成的混合散热条件。在导航栏中选择 Boundary Conditions 选项展开并找到相应边界,双击打开 Wall 对话框,选择 Thermal 选项卡进行边界热条件设置,勾选 Mixed 单选按钮并设定相应参数,如图 8-24 所示。

焊接熔池的表面存在着表面张力,其大小由熔池表面的温度梯度决定。在本例中,熔池所在平面两个方向的表面剪力可表示为

$$\tau_x = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \times \frac{\partial T}{\partial x} \quad (8-30)$$

$$\tau_z = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \times \frac{\partial T}{\partial z} \quad (8-31)$$

式中,  $T$ ——熔池表面温度;

$\gamma$ ——表面张力；

$\frac{\partial \gamma}{\partial T}$ ——表面张力温度系数。

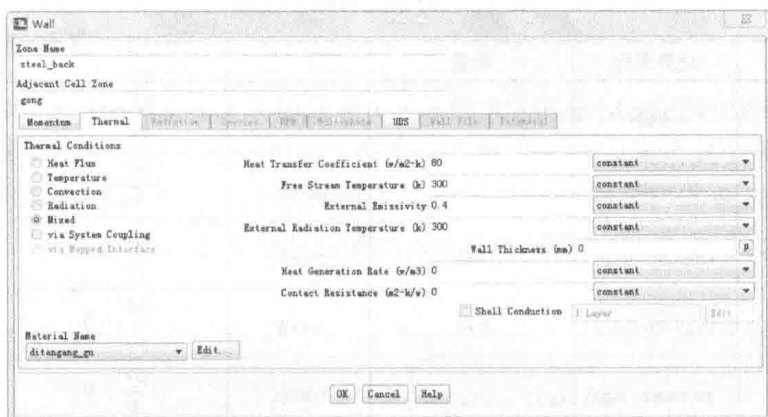


图 8-24 混合散热边界设置

操作中通过设置表面张力温度系数来加入表面张力对熔池表面流动的影响。在导航栏中 **Boundary Conditions** 下面找到工件与电弧区域的交界面并双击，打开 Wall 对话框，选择 **Momentum**（运动）选项卡进行边界运动条件设置，勾选 **Shear Condition**（剪切条件）下面的 **Marangoni Stress** 单选按钮，并在 **Surface Tension Gradient**（表面张力梯度）文本框中输入“-4.3e-5”作为表面张力温度系数，如图 8-25 所示。



图 8-25 交界面表面张力温度系数设置

其他边界条件设置与 8.2 节中类似，这里不再赘述。本例中的边界条件汇总表 8-3。

表 8-3 外部边界条件设置

区域	边界类型	动量	温度 (T)	电势 (V)	磁矢势 (A)
钨极端部	wall	—	5000K	$\sigma \frac{\partial V}{\partial y} = j_{\text{plasma}}$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
焊丝端部	wall	—	5000K	$\sigma \frac{\partial V}{\partial n} = j_{\text{MIG}}$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
等离子气入口	velocity- inlet	$v_{\text{plasma}}$	1000K	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
保护气入口	velocity- inlet	$v_{\text{MIG}}$	1000K	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
出口	pressure- out	—	1000K	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$	0
工件底面	wall	—	300K	0	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
工件侧面	wall	—	式 (8-29)	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
工件上表面	wall	式 (8-30) 和 式 (8-31)	Coupled	Coupled	Coupled

注：Coupled 为界面耦合换热。

表 8-3 中， $\sigma$  为熔池液态金属电导率， $n$  为单位外法向矢量， $v_{\text{plasma}}$ 、 $v_{\text{MIG}}$  为等离子气入口流速及 MIG 保护气体入口流速，且有

$$v_{\text{plasma}} = \frac{Q_{\text{plasma}}}{S_{\text{plasma}}} = \frac{6 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}}{23.73 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 4.2 \text{ m/s} \quad (8-32)$$

$$v_{\text{MIG}} = \frac{Q_{\text{MIG}}}{S_{\text{MIG}}} = \frac{28 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}}{1852.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 0.25 \text{ m/s} \quad (8-33)$$

式中， $Q_{\text{plasma}}$ 、 $Q_{\text{MIG}}$  —— 等离子气与 MIG 保护气流量；

$S_{\text{plasma}}$ 、 $S_{\text{MIG}}$  —— 等离子气与 MIG 保护气入口面积。

等离子弧焊钨极端部及 MIG 焊焊丝端部的电流密度  $j_{\text{plasma}}$ 、 $j_{\text{MIG}}$  为

$$j_{\text{plasma}} = \frac{I_{\text{plasma}}}{S_{\text{T}}} = \frac{-180 \text{ A}}{0.785 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = -2.29 \times 10^8 \text{ A/m}^2 \quad (8-34)$$

$$j_{\text{MIG}} = \frac{I_{\text{MIG}}}{S_{\text{wire}}} = \frac{200 \text{ A}}{1.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 1.77 \times 10^8 \text{ A/m}^2 \quad (8-35)$$

式中,  $I_{\text{plasma}}$ 、 $I_{\text{MIG}}$ ——等离子弧焊与 MIG 焊电流;  
 $S_{\text{T}}$ 、 $S_{\text{wire}}$ ——等离子弧焊钨极与 MIG 焊焊丝端部面积 (根据模型几何尺寸  
 计算分别为  $785\text{mm}^2$  和  $1.13\text{mm}^2$ )。

## 6. 求解设置

选择导航栏中 Solution (求解设置) 下面的 Solution Methods (求解方法设置) 选项, 在任务页面下选择 SIMPLEC 算法。先选用一阶迎风格式加快计算速度, 计算一段时间稳定后改为二阶迎风格式, 以提高计算精度, 其余选项保持默认即可, 如图 8-26 所示。选择导航栏中的 Solution Controls 选项进行求解参数设置, 如图 8-27 所示。

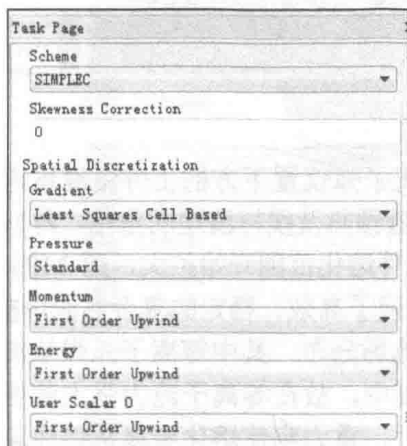


图 8-26 求解方法设置

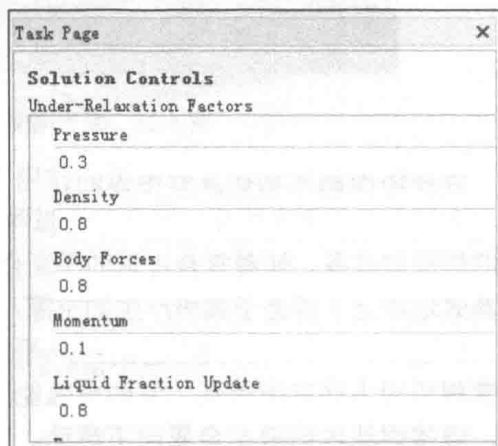


图 8-27 求解参数设置

接下来, 选择导航栏中的 Solution Initialization 选项进行求解初始化设置, 在任务页面保持默认初始值, 并单击 Initialize 按钮进行初始化。

## 7. 求解计算

选择模型树中的 Solution (求解设置) 下面的 Run Calculation 选项, 在任务页面下设定 Number of Interactions (迭代次数) 为 4000, 单击 Calculate 按钮开始运算。

## 8. 复合电弧-熔池模拟结果

如图 8-28 所示为三维复合电弧-熔池统一模型在  $xy$  平面上的温度场分布。

由图 8-28 中可明显看出, 等离子弧具有强烈的电弧压缩作用, 它和 MIG 弧相比有较好的刚直性, 高温区也比 MIG 电弧要细长, 其电弧温度分布呈倒圆锥形, 而 MIG 电弧温度分布呈典型的钟罩形。

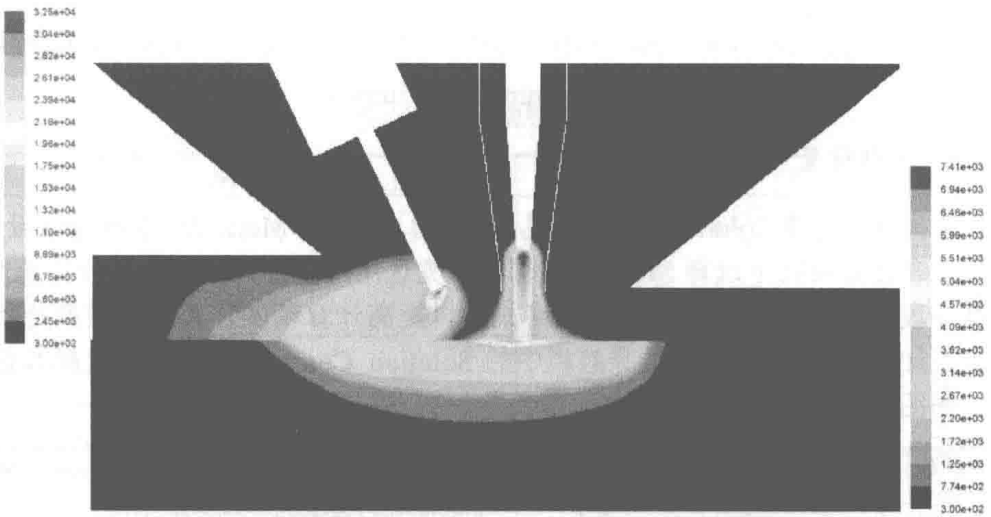


图 8-28 复合电弧-熔池温度场的分布

焊接熔池温度场在复合电弧的作用下，等离子弧位置下方的工件温度迅速升高，这部分工件最先熔化。等离子电弧同时扮演着预热及搅拌清理的角色，为 MIG 焊的焊接做准备。随着复合电弧的不断作用，工件熔化范围开始扩大，而 MIG 焊则高效地填充了等离子弧所产生的空隙，从而实现了高效、稳定的复合热源焊接。

如图 8-29 所示为焊接熔池在  $xy$  平面上的流场分布，其中等离子弧焊接部分与常规弧焊方法有所差别，它的电弧能量高度集中，故在等离子流力强大的推动下，焊接熔池内的液态金属向下流动。与此同时，重力驱使熔化金属从熔池表面流向熔池底部，且所选材料低碳钢的表面张力温度系数为负值，熔池表面液态金属由中心流向边缘，在熔池内部形成环流。

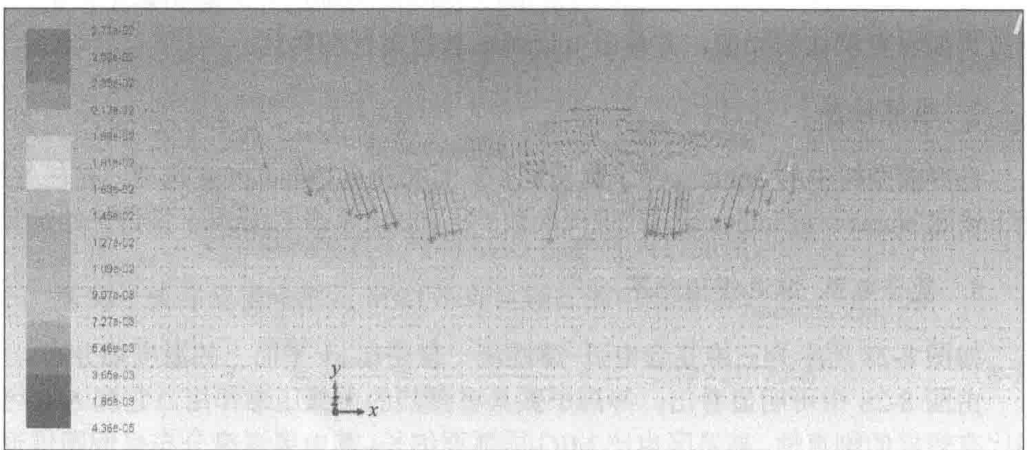


图 8-29 焊接熔池在  $xy$  平面上的流场分布

如图 8-30 和图 8-31 所示为计算所得复合焊接熔池温度场和熔池温度场俯视图。根据图 8-30 和图 8-31 可知计算熔深为 3.5mm，计算熔宽（一半）为 7.75mm。熔池高温区域主要集中于等离子焊下方，形态上前部较深较宽，后部逐渐变浅变窄，符合双椭球体形态。

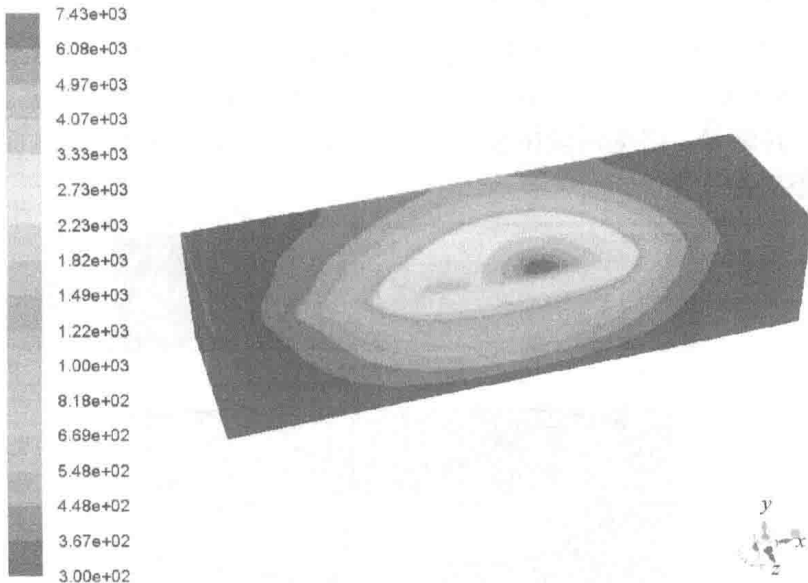


图 8-30 复合焊接熔池温度场

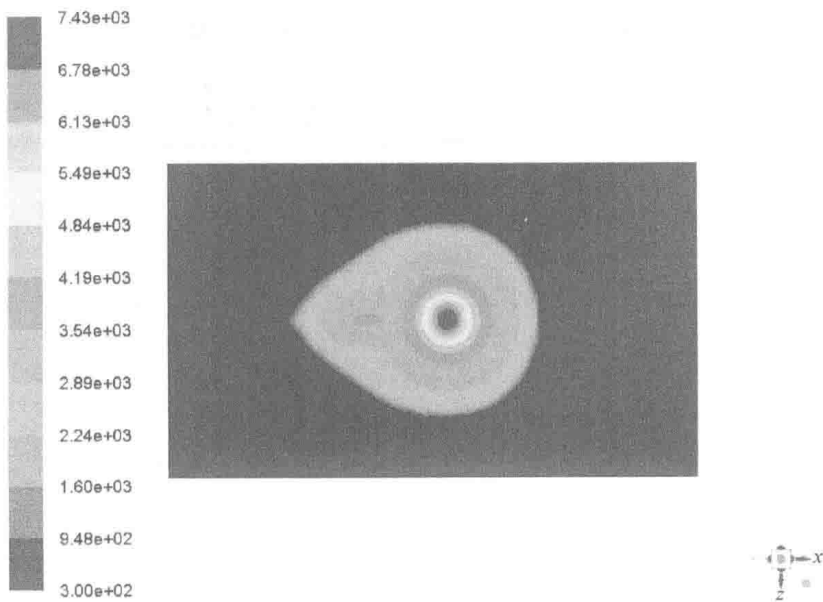


图 8-31 熔池温度场俯视图

为验证本例研究所建立的等离子-MIG 复合电弧模型的可靠性,将模拟计算结果与实验结果进行对比。由于对复合电弧温度场进行直接观测测量比较困难,这里使用相同工艺下熔池的几何尺寸和形状从侧面验证复合电弧及熔池模拟的准确性。焊接实验采用 S355J2W 低碳钢,厚度为 12mm,焊接参数:等离子电流 180A, MIG 电流 200A, 等离子气流量 6L/min, 保护气流量 28L/min。

如图 8-32 所示为计算所得熔池与实验熔池对比图,计算熔深为 3.5mm, 计算熔宽为 15.5mm, 在同样的焊接条件下,实验所得熔深约为 3.6mm, 熔宽约为 15.35mm, 其熔深、熔宽误差在合理范围之内,形态也相吻合,从侧面验证了复合电弧模拟的准确性。

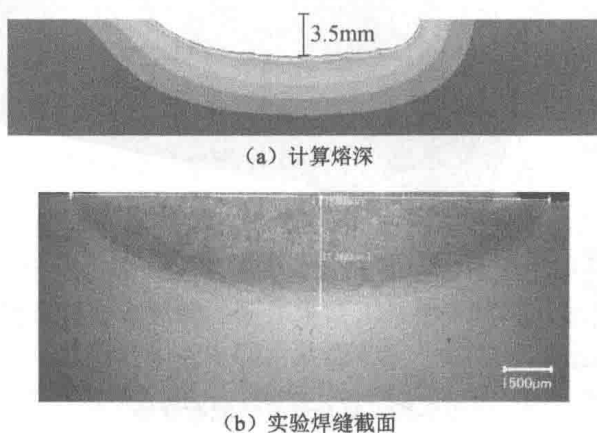


图 8-32 计算所得熔池与实验熔池对比图

# 附 录

## 常用物理量单位换算关系表

物理量	SI/法定计量单位	毫米-吨-秒 (mm-t-s) 单位	转换系数
长度	m	mm	$10^3$
质量	kg	t	$10^{-3}$
时间	s	s	1
热力学温度	K	K	1
电流	A	A	1
力	N	N	1
应力	Pa	MPa	$10^{-6}$
速度	m/s	mm/s	$10^3$
能量	J	mJ	$10^3$
密度	$\text{kg}/\text{m}^3$	$\text{t}/\text{mm}^3$	$10^{-12}$
比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$\text{mJ}/(\text{t}\cdot\text{K})$	$10^6$
潜热	$\text{J}/\text{kg}$	$\text{mJ}/\text{t}$	$10^6$
热传导率	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	$\text{mW}/(\text{mm}\cdot\text{K})$	1
热膨胀系数	$\text{K}^{-1}$	$\text{K}^{-1}$	1
电压	V	mV	$10^3$
电阻	$\Omega$	$\text{m}\Omega$	$10^3$

注：表中阴影部分为 SI 基本单位。



## 参考文献

- [1] RUNNEMALM H. Efficient finite element modelling and simulation of welding[D]. Luleå: Luleå University of Technology, 1999.
- [2] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- [3] 吴言高, 李午申, 邹宏军, 等. 焊接数值模拟技术发展现状[J]. 焊接学报, 2002, 23 (3): 89-92.
- [4] MARCAL P V. Welding Problems, Structural Mechanics Computer Programs[M]. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974: 191-206.
- [5] UEDA Y, YAMAKAWA T. Analysis of thermal elastic-plastic stress and strain during welding by finite element method[J]. Japan Welding Society Transactions, 1971, 2: 186-196.
- [6] HIBBITT H D, MARCAL P V. A numerical, thermo-mechanical model for the welding and subsequent loading of a fabricated structure[J]. Computers and Structures, 1973, 3: 1145-1174.
- [7] GOLDAK J A. Computational Welding Mechanics[M]. New York: Springer, 2005.
- [8] LINDGREN L E. Computational Welding Mechanics: Thermomechanical and Microstructural Simulations[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2007.
- [9] BERGHEAU J M, VINCENT Y, LEBLOND J B, et al. Viscoplastic behaviour of steels during welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2004, 9(4): 323-330.
- [10] VINCENT Y, JULLIEN J F, GILLES P. Thermo-mechanical consequences of phase transformations in the heat-affected zone using a cyclic uniaxial test[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(14): 4077-4098.
- [11] LU F, YAO S, LOU S, et al. Modeling and finite element analysis on GTAW arc and weld pool[J]. Computational Materials Science, 2004, 29(3): 371-378.
- [12] THIESSEN R G, RICHARDSON I M, SIETSMA J. Physically based modelling of phase transformations during welding of low-carbon steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 427(1-2): 223-231.
- [13] 张彦华. 焊接力学与结构完整性原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [14] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [15] 郑振太. 大型厚壁结构焊接过程的数值模拟研究与应用[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [16] 莫春立, 于少飞, 钱百年, 等. 焊接热源计算模式的研究进展[J]. 焊接学报, 2001, 22 (3): 93-96.
- [17] 郑振太, 吕会敏, 张凯, 等. 熔化焊焊接热源模型及其发展趋势[J]. 焊接, 2008 (04): 3-6.
- [18] 陈家权, 肖顺湖, 杨新彦, 等. 焊接过程数值模拟热源模型的研究进展[J]. 装备制造技术, 2005 (03): 10-14.
- [19] 陈家权, 肖顺湖, 吴刚, 等. 焊接过程数值模拟热源模式的比较[J]. 焊接技术, 2006, 35 (1): 9-11.
- [20] 杨建国. 焊接结构有限元分析基础及 MSC.Marc 实现[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [21] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [22] HANSEN J L. Numerical modelling of welding induced stresses[D]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2003.
- [23] PAN M. Minimization of Welding Distortion and Buckling Modelling and Implementation[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [24] JOHNSON W A, MEHL R F. Reaction kinetics in processes of nucleation and growth[J]. Transactions AIME, 1939, 135: 416-458.

- [25] AVRAMI M. Kinetics of phase change ( I ): general theory[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1939, 7: 1103-1112.
- [26] AVRAMI M. Kinetics of phase change ( II ): transformation-time relations for random distribution of nuclei[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1940, 8: 212-224.
- [27] AVRAMI M. Kinetics of phase change ( III ): granulation, phase change and microstructure[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1941, 9: 177-184.
- [28] KOLMOGOROV A N. Statistical theory of crystallization of metals[J]. *Izvestia Akademia Nauk SSSR Ser .Mathematica*, 1937,1(1):355-359.
- [29] LEBLOND J B, DEVAUX J. A new kinetic model for anisothermal metallurgical transformations in steels including effect of austenite grain size[J]. *Acta Metallurgica*, 1984,32(1):137-146.
- [30] KIRKALDY J S, THOMSON B A, BAGANIS E A. Prediction of multicomponent equilibrium and transformation diagrams for low alloys steels[C]. *Proceedings of Symposium on Hardenability Concepts with Applications to Steel, Chicago, USA. 1977: The Metallurgical Society AIME, Heat Treatment Committee/American Society for Metals Activity on Phase Transformations.*
- [31] KIRKALDY J S, VENUGOPALAN D. Prediction of microstructure and hardenability in low alloy steels[C]. *International Conference on Phase Transformations in Ferrous Alloys, Philadelphia, 1983.*
- [32] KIRKALDY J S, VENUGOPALAN D. Phase in Transformations in ferrous alloys[C]. *International Conference on Phase Transformations in Ferrous Alloys, Warrendale, 1984: 125-148.*
- [33] WATT D F, COON L, BIBBY M, et al. An algorithm for modelling development in weld heat—affected zone (part A) reaction kinetics[J]. *Acta Metallurgica*, 1988,36(11):3029-3035.
- [34] HENWOOD C, BIBBY M, GOLDAK J, et al. Coupled transient heat transfer—microstructure weld computations (part B)[J]. *Acta Metallurgica*, 1988,36(1):3037-3046.
- [35] ODDY A S, MCDILL J M J, KARLSSON L. Microstructural predictions including arbitrary thermal histories, re-austenization and carbon segregation effects[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1996,35(3):275-283.
- [36] KOISTINEN D P, MARBURGER R E. A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels[J]. *Acta Metallurgica*, 1959, 7(1):59-60.
- [37] 庄茁, 张帆, 岑松, 等. *Abaqus 非线性有限元分析与实例*[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [38] 赵腾伦. *Abaqus 6.6 在机械工程中的应用*[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [39] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. *精通 CFD 工程仿真与案例实战*[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [40] 江帆, 黄鹏. *Fluent 高级应用与实例分析*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [41] 蔡志鹏, 赵海燕, 吴甦, 等. 串热源模型及其在焊接数值模拟中的应用[J]. *机械工程学报*, 2001, 37 (4): 25-28.
- [42] 蔡志鹏, 赵海燕, 鹿安理, 等. 焊接数值模拟中分段移动热源模型的建立及应用[J]. *机械工程学报*, 2002, 13 (3): 208-210.
- [43] UEDA Y, FUKUDA K, Tanigawa M. New measuring method of three dimensional residual stresses based on theory of inherent strain[J]. *Transactions of the JWRI*, 1979, 8(2):249-256.
- [44] UEDA Y, KIM Y C, YUAN M G. A prediction method of welding residual stress using source of residual stress (report I ): Characteristics of inherent strain (source of residual stress)[J]. *Transactions of JWRI*, 1989, 18(1) : 135-141.
- [45] UEDA Y, YUAN M G. The characteristics of the source of welding residual stress (inherent strain) and its

- application to measurement and prediction (mechanics, strength & structural design) [J]. Transactions of JWRI, 1991, 20(2): 265-273.
- [46] MURAKAWA H, DENG D, MA N. Concept of inherent strain, inherent stress, inherent deformation and inherent force for prediction of welding distortion and residual stress[J]. Transactions of JWRI, 2010, 39(2): 103-105.
- [47] 汪建华, 魏良武. 焊接变形和残余应力预测理论的发展及应用前景(1) [J]. 焊接, 2001 (9): 5-7.
- [48] 汪建华, 魏良武. 焊接变形和残余应力预测理论的发展及应用前景(2) [J]. 焊接, 2001 (10): 4-6, 34.
- [49] 汪建华, 陆皓. 预测焊接变形的残余塑性应变有限元方法[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31 (4): 53-56.
- [50] 汪建华, 陆皓, 魏良武. 固有应变有限元法预测焊接变形理论及其应用[J]. 焊接学报, 2002, 23 (6): 36-40.
- [51] 马继, 陆皓, 汪建华. 预测焊接变形几种方法的比较[J]. 造船技术, 2002, 1: 27-29.
- [52] 魏良武. 固有应变法预测焊接变形的研究及其工程应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2004.
- [53] ARCHER G R. Calculations for temperature response in spot welds[J]. Welding Journal, 1960, 39: 327-330.
- [54] NIED H A. The finite element modeling of resistance spot welding process[J]. Welding Journal, 1984, 63(4): 123-132.
- [55] NIELSEN C V, ZHANG W, ALVES L M, et al. Modeling of Thermo-Electro-Mechanical Manufacturing Processes: Applications in Metal Forming and Resistance Welding[M]. New York: Springer, 2013.
- [56] VARDANJANI M J, SENKARA J, ARAYEE A. A review of finite element analysis (FEA) of resistance spot welding (RSW) [C]. Proceedings of 57th Conference on Welding Technology Review, Jachranka, Poland, 2016, 88(2): 46-52.
- [57] 徐进, 牛占文, 廉金瑞, 等. 电阻点焊过程数值模拟的研究与进展[J]. 焊接技术, 2003, 32 (1): 5-7.
- [58] 鄢东洋, 史清宇, 吴爱萍, 等. 铝合金薄板搅拌摩擦焊接残余变形的数值分析[J]. 金属学报, 2009, 45 (2): 183-188.
- [59] 别俊. 搅拌摩擦焊接热力耦合数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [60] QIN X L. Thermo-elasto-visco-plastic modelling of friction stir welding in an eulerian reference frame[D]. State Collgeg: The Pennsylvania State University, 2009.
- [61] DAN B, SCUTELNICU E, VISAN D. Behaviour simulation of aluminium alloy 6082-T6 during friction stir welding and tungsten inert gas welding[J]. Recent Advances in Manufacturing Engineering, 2011, 1: 103-108.
- [62] LASLEY M J. A finite element simulation of temperature and material flow in friction stir welding[D]. Provo: Brigham Young University, 2004.
- [63] 韩晓辉. 铝合金搅拌摩擦焊三维流场研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2005.
- [64] 王薇. 碳钢焊接热影响区微观组织演变的计算机模拟[D]. 大连: 大连交通大学, 2015.
- [65] 殷凤良, 胡绳荪, 郑振太, 等. 等离子弧焊电弧的数值模拟[J]. 焊接学报, 2006, 27 (8): 51-54.
- [66] 郭朝博. 脉冲 TIG 焊电弧及熔池的数值分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- [67] 栗海霞. K-TIG 焊接电弧特性的数值分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- [68] 殷凤良. 等离子弧焊接过程的数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [69] 周前红. 直流电弧等离子体炬的数值模拟[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- [70] 武传松, 曹振宁, 吴林. 熔透情况下三维 TIG 焊接熔池流场与热场的数值分析[J]. 金属学报, 1992, 28 (10): 427-432.
- [71] 武传松, 郑炜, 吴林. 脉冲电流作用下 TIG 焊接熔池行为的数值模拟[J]. 金属学报, 1998, 34 (4): 416-422.
- [72] 王新鑫, 樊丁, 黄健康, 等. TIG 焊电弧-熔池传热与流动数值模拟[J]. 机械工程学报, 2015, 51 (10): 69-78.
- [73] 朴圣君. 等离子-MIG/MAG 复合焊接电弧及熔池温度场的数值模拟[D]. 大连: 大连交通大学, 2016.