

普通高等教育“十二五”重点规划教材

焊接结构 有限元分析基础 及MSC.Marc实现

哈尔滨工业大学 杨建国 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”重点规划教材

焊接结构有限元分析基础 及 MSC. Marc 实现

主编 杨建国
参编 胡军峰 李 军 夏丽春
主审 方洪渊



机械工业出版社

本书的主要内容包括：焊接热过程及焊接应力与变形、应力的有限元分析基础理论、热过程的有限元分析基础理论，以及具体焊接过程数值模拟仿真与实现等。本书力求理论联系实际，突出焊接热过程及应力变形分析的有限元基础，并适当反映该领域国内外的最新研究成果及发展趋势。

本书可作为焊接技术与工程专业本科生及研究生教材，使其明确焊接过程的有限元分析基础理论及操作流程，也可作为在实际生产过程中希望通过焊接应力与变形的计算机模拟仿真来指导设计或生产的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

焊接结构有限元分析基础及 MSC. Marc 实现/杨建国主编. —北京：机械工业出版社，2012.9

普通高等教育“十二五”重点规划教材

ISBN 978-7-111-39406-8

I. ①焊… II. ①杨… III. ①焊接结构—有限元分析—应用软件—高等学校—教材 IV. ①TG403

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 186489 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：冯春生 责任编辑：冯春生 常建丽

版式设计：霍永明 责任校对：刘志文

封面设计：张 静 责任印制：乔 宇

北京瑞德印刷有限公司印刷（三河市胜利装订厂装订）

2012 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·17.5 印张·418 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-39406-8

定价：35.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010) 68326294

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010) 88379649

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010) 88379203

封面防伪标均为盗版

前 言

作为材料加工工程领域的一个重要分支,焊接是一个涉及多学科的复杂过程。虽然焊接科研工作者借助现代分析测试手段,对焊接问题有了一定的认识,但是仍然存在大量的未知现象有待进一步厘清与探索,其中焊接结构的应力与变形一直是人们研究的热点。

近年来,随着数值模拟技术及软件工程的发展,越来越多的通用商用有限元模拟软件在焊接领域得到了应用,对于一些常见的焊接应力与变形问题,已经不需要研究人员自行编程来分析;但是在使用这些商用软件时,针对合理设计有限元模型并进而判断计算结果的合理性方面,仍需要研究人员具备一定的理论基础,所以有必要对相关的理论进行介绍,以使更多的研究人员能应用有限元分析技术解决实际工程问题。

本书首先介绍了焊接结构应力与变形的基本特点;然后以焊接结构应力分析为切入点,由浅入深,由离散单元至连续单元,由一维问题、平面问题直至三维问题的顺序介绍有限单元应力分析的基本思想、流程及原理;由于焊接问题为热机耦合问题,所以在后续的章节中介绍了热过程的有限单元分析基本思路,以及基于加权余量法、伽辽金法对一维问题、平面问题直至三维问题的热分析有限单元法的基本思想、基本原理,并针对焊接问题的特点介绍了焊接传热问题的有限单元处理方法,尤其是对焊接模拟精度起关键影响的焊接热源模型相关问题进行了系统分类与全面介绍;书中余下的章节对焊接结构分析领域的焊接热循环问题、焊接应力与变形分析以及焊接工艺优化等典型问题的分析流程及方法进行了介绍,内容涉及平板对接过程数值模拟建模及结果分析、多层多道焊管板接头建模方法及焊道设置、存在接触问题的焊接过程的有限单元建模方法等。另外,本书对于与一些特殊的焊接过程直接相关的子程序也进行了详细介绍,期待读者通过阅读本书能够解决一些具体的复杂焊接问题。

本书的附录介绍了 MSC. Marc 软件简介及安装、Marc 的进阶操作、Marc 材料中文对比以及退出号的解决办法。

本书主要由哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室杨建国副教授担任主编,具体编写分工为:第1~4章及附录由哈尔滨工业大学杨建国副教授编写,第5、8章由吉利汽车公司胡军峰博士编写,第6章由鲁科斯钎焊材料苏州有限公司的夏丽春编写,第7章由广东省工业技术研究院李军博士编写。全书由哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室方洪渊教授审阅,哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室闫久春教授对本书的编写也提出了一些有益的建议,哈尔滨工业大学的程荣龙硕士、王涛博士、方坤博士、王莘博士对本书部分章节进行了初期校核,同时在此表示感谢。书的编写中还引用了一些专家学者的著作、书籍及论文,其中一部分已经列在参考文献中,另外还有一些未列入,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中疏漏和错误之处在所难免,敬请专家和广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 焊接热过程及焊接应力与

变形 1

1.1 焊接热过程 1

1.2 焊接残余应力 2

1.2.1 残余应力的形成过程 2

1.2.2 残余应力分析 4

1.3 焊接变形 5

1.4 焊接过程有限元分析的意义

及应用 6

1.4.1 有限元方法简介 6

1.4.2 焊接过程有限元分析的意义与

现状 7

第2章 应力的有限元分析基础

理论 10

2.1 有限单元方法的基本思想 10

2.2 刚度矩阵 12

2.2.1 柔度矩阵方法 12

2.2.2 刚度矩阵方法 14

2.2.3 节点编号策略 15

2.3 一维弹性问题的有限元法 17

2.3.1 线性弹簧位移分析 18

2.3.2 一维简单连续体的分析实例 23

2.4 虚功原理 26

2.5 连续体的平面应力有限单元分析 27

2.5.1 位移与节点坐标的关系 27

2.5.2 单元内的弹性应变 29

2.5.3 单元中的应力 30

2.5.4 单元应力与节点力之间的

关系 31

2.5.5 应用等应变三角形单元求解的

具体过程 35

2.6 三维应力分析的有限元法 36

第3章 热过程的有限元分析基础

理论 39

3.1 问题的描述 39

3.2 均质棒材的一维稳态导热分析 39

3.2.1 单一棒材的稳态传热有限元

分析 39

3.2.2 复合棒材中的热传导有限元

分析 40

3.3 加权余量法 41

3.4 伽辽金有限元方法 46

3.5 一维稳态传热问题的伽辽金有限元

解法 52

3.6 表面对流的一维稳态传导问题的伽

辽金有限元解法 58

3.7 三维稳态传热问题有限元分析 61

3.8 瞬态传热问题的有限元分析 62

第4章 焊接热源模型及焊接应力与

变形有限元法 67

4.1 焊接传热问题的处理方法 67

4.2 焊接热源模型 67

4.2.1 面热源 67

4.2.2 线热源 68

4.2.3 体热源模型 69

4.2.4 组合热源模型 73

4.2.5 广义双椭球热源模型 73

4.3 三维焊接结构应力变形的有限元法 75

第5章 平板对接焊缝的温度场和

应力场 77

5.1 问题的描述 77

5.2 平板的有限元网格划分 77

5.3 施加材料性能 80

5.4 建立焊接路径 85

5.5 边界条件 87

5.5.1 首先加载焊接温度场的边界

条件 87

5.5.2 定义力学边界条件 89

5.6 定义工况 91

5.6.1 定义焊接过程 91

5.6.2 定义冷却过程 92

5.7 定义作业	94	母材的接触关系	191
5.8 结果分析	95	7.6 定义初始条件	195
5.8.1 温度场结果分析	96	7.7 定义边界条件	195
5.8.2 应力场的分析	102	7.8 定义挤压头的运动	198
第6章 多层多道焊的建模过程	107	7.9 定义工况	200
6.1 问题的描述	107	7.10 定义作业	202
6.2 网格划分	108	第8章 焊接相关子程序的原理及	
6.2.1 模型的建立	109	举例	204
6.2.2 截面网格划分	114	8.1 公共块的概念及应用场合	204
6.2.3 定义焊缝单元及其他单元	126	8.2 常用的公共块所包含的变量符号及	
6.2.4 进行扩展操作	140	含义	205
6.2.5 划分平板其他部分的单元	141	8.3 内部编号和外部编号之间的差别	205
6.2.6 通过移动对称操作获得整体		8.4 获取节点初始坐标的程序段	206
结构	149	8.5 获得三向总位移的程序段	207
6.3 定义材料性能	152	8.6 获得积分点坐标	207
6.4 焊接路径的设置	162	8.7 获得单元积分点的变量	208
6.5 焊道的设置	165	8.8 获得节点变量的程序	210
6.6 初始条件的定义	168	8.9 单元死活程序的详细解释	212
6.7 边界条件的定义	169	8.10 坐标变换的子程序	216
6.7.1 焊接温度场的边界条件	169	8.11 flux 子程序	216
6.7.2 力学边界条件	174	8.12 plotv 子程序: 写出单元变量	218
6.8 定义 LOADCASE	177	8.13 Film. f 子程序的使用法	221
6.9 定义作业	180	附录	224
第7章 涉及接触问题的焊接过程		附录 A MSC. Marc 软件简介及安装	224
建模	183	附录 B Marc 进阶操作	237
7.1 问题的描述	183	附录 C Marc 材料中文对比	268
7.2 有限元模型的建立	184	附录 D 退出号的解决办法	269
7.3 施加材料性能	190	参考文献	272
7.4 建立焊接路径和焊道	191		
7.5 定义接触体和夹具、挤压头与			

第 1 章 焊接热过程及焊接应力与变形

焊接过程是一个不均匀的加热与冷却过程，材料在焊接热的作用下经历了复杂的物理与化学作用，这种过程的结果直接影响了焊接接头的冶金及力学性能，并可引发焊接结构的应力与变形。本章将对焊接热过程进行简单介绍，同时对焊接应力与变形的形成机制进行简要探讨，最后分析将数值模拟技术引入焊接过程分析的意义及发展历程。

1.1 焊接热过程

在焊接过程中，焊接热源所引发的焊接热循环将导致材料发生物理状态变化、物理冶金及相变、瞬态的热应力及材料的迁移等现象。焊接完成后，由于快速的冷却凝固而产生比较差的微观组织以及由于存在不可逆应变而导致的焊接应力与变形，最终表现为结构的物理不连续性。

为了能明确以上物理过程及现象，对焊接传热过程进行分析显得十分必要。相应的焊接热过程模型的建立可以为焊接过程的分析提供一种定量的分析工具。

图 1-1 所示为焊接热过程示意图。图中的焊接热源沿着一条直线作匀速运动，无论是刚刚引燃电弧，还是熄灭电弧的瞬间，都会在焊件建立起一个瞬态的温度场。如果在电弧引燃后可以保持一个比较长的时间而不熄弧，则焊件的温度场相对于移动坐标系而言处于一种稳定状态或者说热平衡状态。在电弧下方的金属，由于焊接电弧的热作用而熔化形成熔

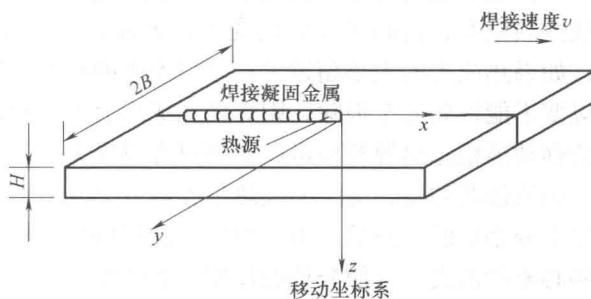


图 1-1 焊接热过程示意图

池。焊接电源输入的热量一部分进入待焊金属中，其他部分通过弧柱或者待焊材料表面以对流、辐射的形式散失到周围的空气中。焊接完成后，在接头中存在三个冶金区域，即熔化区、热影响区及母材区。焊接峰值温度以及随后的冷却速度将决定热影响区的组织特征；而温度梯度、凝固速度及在熔池边界的冷却速度将决定熔化区金属的组织特征。熔池的大小以及金属的流动方向将决定熔深以及稀释率等指标。

一般来讲，在焊接过程中准稳态传热及瞬态传热都会出现，其中通常发生于起弧及熄弧阶段的瞬态传热行为受到人们的普遍关注。这主要是由于诸如焊接热裂纹等焊接缺陷往往发生在这种温度非平衡状态下的凝固过程中，如起弧阶段形成的裂纹在后续的焊接热应变作用下可能进一步发生扩展；而收弧阶段由于凝固速度较之准稳态下要快几倍，因而在收弧的弧坑中也可能产生裂纹，且这种裂纹将沿着焊接接头进行扩展。另外，在焊接修复过程中，由于补焊焊道比较短，温度分布极不均匀，使得焊接热影响区发生脆化，从而引

发裂纹问题或者使该位置成为疲劳裂纹源。

准稳态是指相对于移动的焊接热源而言处于稳定状态的传热过程，即在静态坐标系下处于非稳定状态，而在移动坐标系下处于稳定状态的一种传热状态。一般来说，准稳态传热在整个焊接过程中处于主导地位，主要的热膨胀与收缩均发生在此过程中，而焊接残余应力与变形则是焊接过程中热应力与应变在焊接热循环完成后残留在焊件中的结果。

如前所述，由于瞬态传热条件下经常导致熔化区裂纹及热影响区出现有害的冶金组织，所以分析裂纹及脆化问题经常采用瞬态传热的模式。而为了分析不同焊接工艺条件下的焊接特点时，则经常采用准稳态传热分析。比如，在一定的焊接速度范围条件下，由于特定的焊接方法无法满足必要的焊接热输入（避免由于快速的凝固与冷却导致的相关问题）而必须采用诸如焊前预热等工艺时，采用准稳态分析方法即可满足分析的需要。焊接热裂纹是由于焊接冶金因素与热应变因素共同导致的问题，其中热应变主要是由拘束状态与熔化金属的收缩而导致的焊缝金属在熔化温度区间产生的位移作用而引起的；冶金因素主要是在非平衡的凝固条件下出现了成分偏析及共晶成分。应用冶金学理论，可以实现对以上提到的化学成分偏析、共晶的数量与分布、晶粒长大的速度与方向以及焊缝金属在高温下的位移等的确定。不过，为了实现以上问题的准确分析，往往需要采用比较精确的热源模型，这种模型一般要综合考虑焊接能量的分布状态、熔化潜热以及表面热量的损失等。

焊接变形过程的分析更离不开焊接热过程的分析。焊接热过程将导致焊接接头中出现非线性热应变，进而导致焊接变形；另外，由于焊接过程中出现不协调应变而产生热应力，如果热应力的大小超过了相应温度下的材料屈服强度，则会产生塑性应变，若这些塑性应变不能得到完全消除，则焊接完成后会导致焊接残余应力与变形。目前，应用能量集中的移动准稳态热源模型可以实现对焊接应力与变形的模拟与分析。

应该说明的是，为了明确热过程对以上几方面的具体影响，确定准确的热过程数理模型是十分必要的。但是，由于焊接热过程的复杂性，通常在分析焊接热过程时不得不提出一些必要的假设，以使分析的模型得到简化。

1.2 焊接残余应力

所谓残余应力，是指在外载荷去除之后仍然存在于构件内部的应力，有时残余应力也称为内应力。对于焊接过程，焊接残余应力是指焊后残留在焊件内的焊接应力，其实质是由于构件经历了不均匀受热而导致的内应力，一般也称为热应力。

1.2.1 残余应力的形成过程

1. 三杆金属框架不均匀受热应力演变历程

由于受热不均匀而导致的残余应力可以由金属框架在拘束条件下的加热与冷却过程来定性描述。图 1-2 所示是由两个刚性体连接的三个完全相同的金属杆，在初始时刻，三个杆件温度相同。如果只加热中间的杆件受热，而两侧杆件的温度保持不变，则理论上前者会由于受热膨胀而伸长，但其热膨胀受到两侧杆件的阻碍（见图 1-2a），不能自由进行。因此，中间杆件中就会产生压应力，而且这种压应力随着中间杆件的加热温度的升高

而提高。如果中间杆件受到的应力达到其材料的屈服极限，杆件中将产生压缩塑性变形。当杆件温度逐渐降低时，由于受到两边杆件的拘束作用（见图 1-2b），中间杆件内部的压应力迅速降低，并转变为拉应力，如果加热阶段的压缩塑性变形很大，则冷却后在中间杆件中甚至达到材料的拉伸屈服强度。为达到结构内部的应力平衡，此时两侧杆件受到压应力，并且其数值为屈服强度的一半。

2. 焊接过程中的应力演变历程

焊接过程的应力演变历程与上面提到的三杆金属框架演变历程规律基本一致。此时，焊缝及其近缝区金属类似于中间的杆件，而远离焊缝的金属则可认为类似于两侧的杆件（见图 1-2c）。

由于远离焊缝的金属对焊缝及近缝区金属的膨胀与收缩存在拘束作用，从而导致焊后冷却至室温时在焊缝及近缝区存在残余拉应力，而在远离焊缝的区域则存在压应力。然而，焊接过程相对于三杆框架结构要复杂得多，因而有必要对焊接过程的应力分布特征进行介绍。图 1-3 所示为焊接过程中的温度及纵向应力演变。图中的临近焊缝的阴影区为发生塑性变形的区域。A—A 截面为焊接熔池前方受热影响极小的截面，此截面上的温度接近室温；B—B 截面为通过熔池的截面，它的温度梯度非常大，中间熔池区域的温度最高甚至可以达到材料的沸点，而远离熔池的位置与室温接近；C—C 截面为熔池后方一段距离的截面，它的温度分布趋于平缓，温度梯度明显降低；当距离熔池后方非常远的位置，如截面 D—D，整个截面上的温度又都趋近于室温，而且温度的分布又非常均匀。

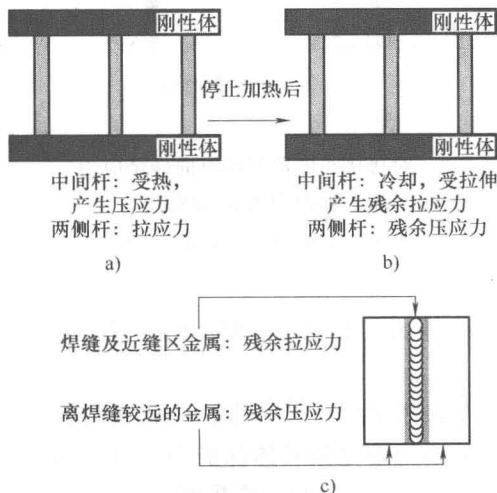


图 1-2 热致应力

a) 加热过程 b) 冷却过程 c) 焊接残余应力

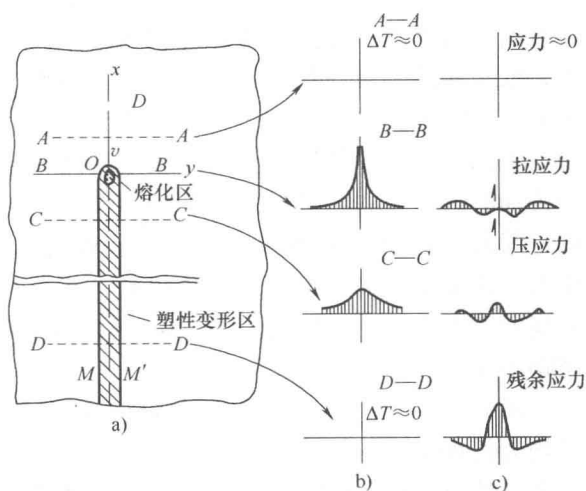


图 1-3 焊接过程中的温度及纵向应力演变

a) 动态焊接过程 b) 温度分布 c) 纵向应力

对于焊接纵向应力的分布，也可以从这几个截面进行分析。A—A 截面几乎没有受到热作用，因而其应力趋于零应力水平；B—B 截面中熔池区域的金属由于处于液态而没有承载能力，因而该位置的应力趋于零，而与熔池临近的位置由于其受热膨胀受到更远处低温金属的拘束而表现为压应力，同时由于在高温条件下材料的屈服强度会降低，所以这些区域的金属一般都达到了该温度下的屈服极限，对于远离熔池的金属，由于受到近缝区金

属的膨胀作用而产生拉应力，并且与近缝区的压应力相平衡；对于 $C-C$ 截面上的金属，由于焊接电弧已经离开，温度开始下降，此时焊缝与近缝区的金属趋于收缩，从而产生拉应力，而与之邻近的区域则为压应力状态；随着距熔池距离的增大， $D-D$ 截面上焊缝及近缝区的金属进一步冷却收缩，从而产生更高的拉应力，而距离焊缝较远的区域则为压应力，由于 $D-D$ 截面已经远离熔池，这样这个位置的温度分布比较均匀，不会有很大的变化，所以此位置的应力就是焊接残余应力。

1.2.2 残余应力分析

图 1-4 所示为对接接头中典型的纵向残余应力 σ_x 与横向残余应力 σ_y 分布图。Masubuchi 和 Martin 等人对纵向残余应力沿板宽方向的分布进行了数学拟合，并获得了如下的经验公式：

$$\sigma_x(y) = \sigma_m \left[1 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right] \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right]$$

式中， σ_m 为最大残余应力峰值，通常这个数值能达到焊缝金属的屈服极限； b 为纵向残余应力区的宽度（见图 1-4a）。

图 1-4b 所示为横向残余应力沿板长方向的分布，可以看出横向拉应力的峰值较低，且出现在焊缝纵向的中间位置。这是由于该位置的横向热收缩受到距离焊缝较远区域温度较低金属的拘束作用的结果。根据力平衡的原则，中间受到的拉应力与两侧受到的压应力平衡。另外，如果这种横向收缩受到一个外加的约束（如在母材两侧使用刚性夹具固定等），相当于在两侧施加了均匀的横向拉应力，这会使横向应力水平整体提高，甚至使横向应力均为拉应力。然而，这种横向拘束对于纵向应力的影响是非常小的，甚至可以忽略不计。

图 1-5 所示为 5083 铝合金对接接头纵向残余应力的测量与计算结果，两块板材的尺寸均为长 60cm，宽 27.5cm，厚 1cm。所采用的焊接方法为熔化极气体保护焊。计算结果主要是基于有限元分析的方法，实验结果是取自 Satoh 和 Terasaki 的实验数据。

焊接残余应力往往导致氢致开裂和应力腐蚀开裂。为了克服焊接残余应力的不利影响，通常采用焊后热处理的方法来降低残余应力。图 1-6 所示为焊后热处理温度及保温时间对钢结构焊缝残余应力的影响。除了焊后热处理外，如预热、锤击以及振动时效也常常用来消除焊接残余应力。

关于焊接应力的产生机理、各种分布状态等内容，可以参阅哈尔滨工业大学方洪渊教授主编的《焊接结构学》。

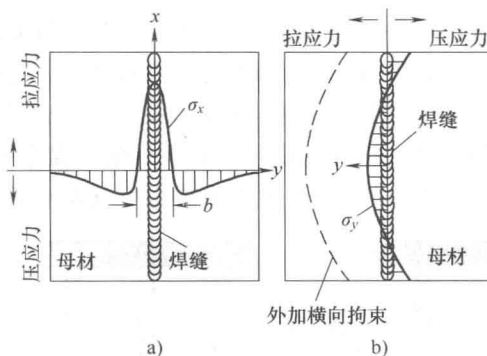


图 1-4 对接接头中典型的纵向残余应力 σ_x 与横向残余应力 σ_y 分布图

a) 纵向残余应力 b) 横向残余应力

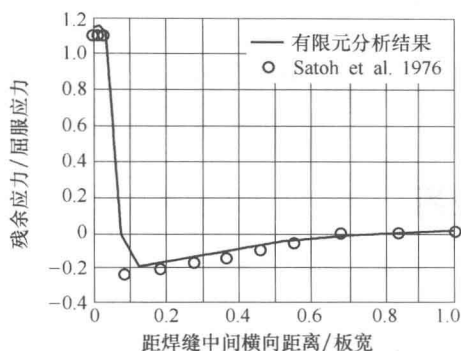


图 1-5 5083 铝合金对接接头纵向残余应力测量与计算结果

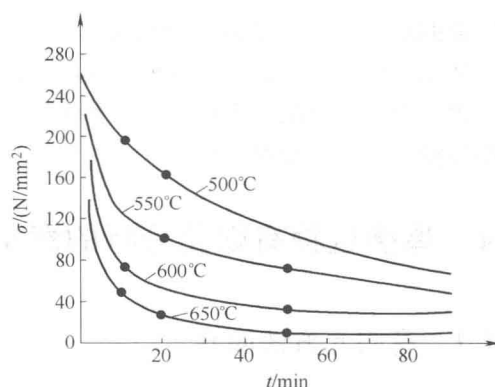


图 1-6 焊后热处理温度与保温时间对钢结构焊缝残余应力的影响

1.3 焊接变形

由于焊缝金属在焊接过程中的凝固收缩以及热收缩使得焊接构件有变形的趋势，图 1-7 所示为焊接结构几种典型的变形。一般来说，焊接结构能够发生横向收缩变形（见图 1-7a）、纵向收缩变形（见图 1-7b）以及由于横向收缩在深度方向的不均匀分布而导致的角变形（见图 1-7c），这种横向收缩在深度上的不均匀性主要是由于焊缝表面熔宽大于焊缝背面熔宽，这样使得焊缝金属上表面的凝固收缩以及热收缩大于下表面相应的收缩，从而产生向上的角变形。而对于像电子束焊接接头这样熔宽在上下表面差别不大的接头，一般角变形量非常小。同样，角接头也会由于焊缝的凝固收缩与热收缩导致角变形（见图 1-7d）。图 1-8 所示为不同厚度的 5083 铝合金对接接头的角变形，从图中可以看出随着工

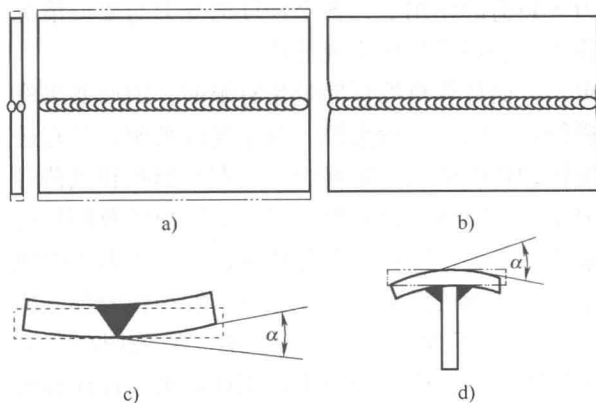


图 1-7 焊接结构几种典型的变形

- a) 对接接头横向收缩 b) 对接接头纵向收缩
c) 对接接头角变形 d) 角接头角变形

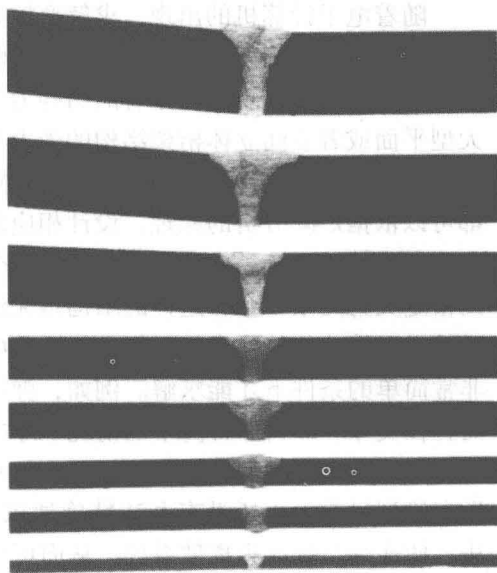


图 1-8 不同厚度的 5083 铝合金对接接头的角变形（厚度范围为 6.4 ~ 38mm）

件厚度的增加,角变形越来越明显,这主要是由于随着厚度的增加,填充金属的量将增加,从而导致更明显的凝固收缩与热收缩差异。

关于焊接变形的产生机理、各种形态及控制措施等内容,可以参阅哈尔滨工业大学方洪渊教授主编的《焊接结构学》。

1.4 焊接过程有限元分析的意义及应用

1.4.1 有限元方法简介

有限元方法是适应电子计算机的使用而发展起来的一种有效的数值计算方法,该方法起源于20世纪50年代航空工程中飞机结构的矩阵分析。结构矩阵分析是结构力学的一种分析方法。结构矩阵分析的方法认为:整体结构可以看成由有限个力学小单元相互连接组成的集合体,每个单元的力学特性可以比作建筑物中的砖瓦,装配在一起就能提供整体结构的力学特性。

有限元方法不去直接分析整体结构,而进行力学小单元的分析。其基本出发点是人们对于复杂物质世界的认识能力较低,不能完全认识清楚复杂的事物,因而往往把复杂系统分解成多个性态容易理解的单个元件或者“单元”,研究其性态,再以这些元件重构原来的系统以得到整体性态,这是工程技术人员经常采用的分析问题的方法。

有些系统由有限个完全确定的元件组成,被称为离散系统,如电阻及电阻网络,杆件及由杆件组成的桁架等;另外一些系统则可以被无限地分割,这种问题只有利用无穷小这样的数学概念才能定义,也就意味着这样的系统由无限个单元组成,这种系统称为连续系统,如一块受力的平板等。

随着电子计算机的出现,求解离散系统问题变得比较容易,即使单元数目非常大时,也是如此。例如桁架结构,过去结构力学的方法只能求解比较简单的、杆件数目比较少的结构;计算机的出现,在原有的结构力学原理的基础上,就可以求解杆件数目成千上万的大型平面或者空间立体桁架结构的受力与变形问题,如大型体育场馆的屋顶或雨棚,现在多采用球体连接的立体网架,它在风、重力等载荷的作用下,各个杆件的受力与变形情况都可以依据矩阵分析的原理,设计相应的算法,利用计算机实现计算。

对于连续系统,由于实际上有无限个单元,而计算机的存储量是有限的,因而如果将网格定义为无限多个,这样的结构是无法进行计算的。一般来说,对于连续系统,只有通过数学运算才能精确求解。但是,工程中能得到精确解的问题很少,只有在形状和载荷等非常简单的条件下才能求解。例如,弹性力学中的薄板弯曲问题,只有矩形板以及圆形板而且在支撑和载荷非常简单的情况下才能求出解析解。同样,在传热学以及流体力学中也是如此。而工程中的结构形状一般比较复杂,如内燃机活塞的温度分布,发动机内部气流形态等到目前为止还没有办法精确地求出。所以,工程上处理连续系统一般采用离散方法,使连续系统成为离散系统,从而可以采用解决离散系统的方法,用计算机进行计算与分析。连续体离散为离散体必然带来一定的近似性,但是,它是这样一种近似:当离散变量的数目增加时,它可以逼近真实的连续解(此处不考虑由于计算误差等的影响)。有限元方法用于求解连续系统问题时就是一种一般的离散化方法。

有限元方法最初是用于分析飞机的结构强度,通过这一方法可求得组成飞机结构的各个杆件的受力和变形的数值分析结果,这是离散系统的弹性杆系问题。1960年,飞机结构工程师 Clough 在他的论文中第一次采用有限元 (Finite Element Method) 这一术语,并用有限元的思想求解了平面弹性问题。随着工程技术人员以及数学、力学领域的专家学者对这一理论的丰富,该方法已经从原来的处理弹性力学问题拓展到了弹塑性力学、传热学、电磁学以及流体力学等领域。目前,有限元方法几乎可以用来求解所有的连续介质和场问题,包括静力学问题和与时间相关的动力学问题以及与振动相关的问题。

1.4.2 焊接过程有限元分析的意义与现状

对于一些简单的焊接结构,通过解析计算及应用部分经验公式,可以较为准确地预测焊接残余应力与变形,但是对于复杂结构,以上方法就无法实现准确地预测了。针对此问题,目前比较有效的解决手段是借助于有限元分析等数值技术来进行焊接温度场、应力应变场及变形行为的预测,该方法不但能最终预测以上的结果,而且能够给出这些问题的演化过程,对于工艺优化具有指导意义。

在国外,焊接领域的数值模拟从20世纪60年代就开始了较为广泛的研究,但直到上世纪80年代末、90年代初才开始进行简单焊接接头的三维模拟。近20年来,随着计算机水平的发展与有限元技术的进一步完善,数值模拟在焊接领域得到了快速的发展与应用。

由于对变形场的模拟有赖于弹塑性理论的发展,并且比温度场模拟复杂得多,所以起步较晚。有限元成功地用于弹塑性问题始于1960年。20世纪70年代初,日本的上田幸雄等首先以有限元方法为基础,提出了考虑材料力学性能与温度有关的焊接热弹塑性分析理论,从而使复杂的动态焊接应力应变过程的分析成为可能。此后,他们在这方面有许多发展,特别是发展了固有应变理论,取得了丰硕的成果。图1-9所示为采用固有应变法预测所得的一个船体结构实验模型的焊接变形。

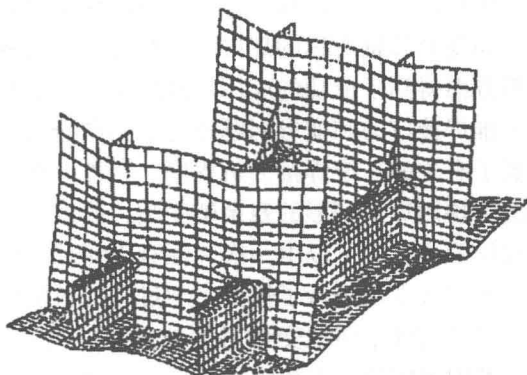


图1-9 船体结构实验模型的焊接变形

1973年,美国的 Hibbit 和 Marcal 第一次将有限元用于焊接领域残余应力的预测。他们将一个平板上的气体保护焊还原抽象化为一个轴对称的模型,采用解耦模型(即热过程与应力应变分析过程独立考虑)进行模拟,由于未考虑塑性加载历史影响及材料的性能随温度的变化,残余应力的预测结果精度较低。随后,美国的 H. D. Hillbert、E. F. Rybicki、Y. Iwamuk 以及 K. Masubuchi 等在焊接残余应力和变形的预测和控制方面进行了许多研究工作,将引起焊接变形的金属运动分为三种模式:焊件因电弧加热作为简单物体的运动(模式1);焊缝金属凝固前相连的两个分开部分的运动(模式2);冷却凝固后连接部分刚体的运动(模式3)。

加拿大的 J. Goldak 等对从熔点到室温的焊接热应力进行了分析研究,提出了各个温

度段的本构方程：在温度低于 0.5 倍熔点时速率不依赖性或弹塑性；温度从 0.5 倍熔点到 0.8 倍熔点时速率依赖性或粘弹塑性；温度超过 0.8 倍熔点时为线粘塑性模型。

瑞典的 L. Karlsson 等对大板拼接的焊接变形和应力进行了分析研究，特别是分析了焊缝前端间隙的变化和定位焊的影响；另外还采用同样的方法对薄壁管子的焊接残余应力和变形进行了分析，同时提出了采用辅助热源防止单面焊终端裂纹的有效方法。

Nasstrum 在 20 世纪 90 年代对三维和板壳联合的焊接模型进行了分析。

法国的 J. B. Leblond 对相变时钢的塑性行为进行了理论和数值研究，在上述研究等基础上发展了 SYSWELD 软件，该软件可用于淬火、表面处理、焊接、热处理和铸造等过程的分析研究。1980 年，Ueda 等人在模型中考虑了材料性能随温度的变化及变形过程中的材料硬化作用。1982 年，Argyris 等人建立了带耦合的粘弹塑性模型并计算了残余应力，结果证明了热力耦合对模拟的结果影响甚小。

Anderson 等人对平面应力条件下的平板对接应力场进行了数值模拟，考虑了材料性能随温度的变化及动态应变强化效应，并提出了对焊接变形进行三维模拟。在处理材料热物理性能随温度变化时，Φ. Grong 认为材料热物理参数随温度变化的问题一定程度上可以通过在特定温度范围内选择一个较合理的平均值来加以克服，而结晶潜热的影响可以通过调整电弧的热效率加以考虑。

国内在 20 世纪 80 年代初，西安交通大学和上海交通大学等学校开始了关于焊接热弹塑性理论及数值分析方面的研究工作。西安交通大学与沪东造船厂合作对单面焊终端裂纹的产生机理和防止进行了试验和数值模拟研究，取得了显著成效。上海交通大学开发了二维平面变形和轴对称的焊接热弹塑性有限元分析程序，并在薄板、厚板和管子等焊接应力分析方面得到了成功的应用，此后又引入了高温蠕变和相变的影响。他们与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，发展了有关的三维焊接分析程序。另外，在薄板焊接失稳变形的研究方面也取得了进展，提出了预测焊接变形的残余塑变法，通过焊接热输入和板厚可以确定残余塑变的总和及其所在位置，从而可以由一次弹性有限元计算预测较复杂焊接结构的焊接变形。

天津大学也进行了焊接力学过程的数值模拟，通过采用单元再生、单元死活方案，消除了焊接构件中熔池变形对熔池尾部应力应变场的影响；通过加大材料线膨胀系数的方法，考虑凝固收缩对熔池尾部应力应变场的影响；通过采用热弹塑性力学方法处理了固相区的应力应变本构关系，从而建立了一种计算凝固裂纹驱动力的有效方法。

哈尔滨工业大学在焊接结构数值模拟领域也进行了卓有成效的研究，其研究团队提出的考虑电弧偏转影响的广义双椭球热源模型，使得焊接过程温度场的计算结果与实际检测结果之间的误差在 30℃ 以内，而采用普通的双椭球热源模型的计算结果与实际测试结果之间则产生了 230℃ 的差别，可以看出其提出的热源模型的精确程度大大提高；所提出的节点动态松弛法进行多层多道焊接，使得计算效率较单元死活方法提高 10% 以上，计算精度远远高于单元死活方法，同样，这种方法相对于静态单元法的收敛情况又有很大的优势，克服了静态单元方法不易收敛的问题；提出的多模型映射法则实现了多模型、多工艺的数据传递问题，使得复杂结构的连续虚拟加工成为可能；而相似理论的应用以及相关相似准则的推导，为巨大结构的预先研究提供了理论参考与实例；虚拟制造环境下焊接结构的有限元分析系统，利用了虚拟制造中使用户感知并沉浸于环境的虚拟现实技术，使传统

的有限元分析过程变得直观、易懂,可以让非专业人员方便地进行抽象的有限元分析,有利于有限元方法在我国的推广应用。目前,该团队的研究成果已经应用于大尺寸铝合金厚板的制造过程、某型号产品壳圈的制造过程、水轮机转轮的焊接过程、某型号飞行器舱体的焊接过程以及某型号产品加力燃烧室重要部件的焊接过程等多种产品的研制与制造,涉及我国航空航天、舰船、兵器和水利等诸多领域。

另外,多年来,我国在从事焊接力学数值模拟领域的研究也进行了较广泛的国际合作,取得了以下主要成果:

- 1) 研制了适合于各种焊接热输入条件下的焊接传热有限元分析方法和相应的计算机程序,解决了“振荡”等问题,提高了计算精度。
- 2) 研究了提高三维焊接热弹塑性有限元计算精度和稳定性的有效方法,并研制了相应的计算机程序,且在若干三维复杂焊接结构的分析以及失稳变形分析中得到了成功的应用。
- 3) 成功地进行了考虑相变的动态残余应力的分析研究。
- 4) 引入考虑高温蠕变的粘弹塑性有限元方法,对局部焊后热处理的评定准则进行了全面的研究,提出了新的评定方法,在国际上受到广泛重视。
- 5) 提出和发展了基于弹性计算的预测焊接变形的残余塑变有限元方法,包括采用三维、板壳单元和考虑大变形,为大型复杂焊接结构的分析提供了强有力的工具。该项技术为实际工程应用带来了突破性的进展。

在焊接应力与变形数值模拟发展过程中,研究者考虑的焊接因素越来越多,结果也越来越精确,但同时实际焊接结构的数值模拟也面临着很大的挑战,特别是大型结构件焊接的数值模拟。大型结构件由于本身的复杂性,给数值模拟造成了许多困难,主要表现为划分的单元数量很多,自由度数目庞大;增量步细,计算量大;非线性度高,求解收敛困难等。

第2章 应力的有限元分析基础理论

有限元方法概念最初是从结构分析中开始的，然后才逐步拓展到热分析、动力学分析和声场分析等领域。本书的目的是介绍焊接过程的数值模拟，即焊接热过程的模拟及焊接应力与变形的模拟。虽然第1章介绍了焊接热过程，但是本书还是遵循有限元的发展历史优先在本章介绍应力分析的有限元基本理论，使读者熟悉有限元的基本概念及分析思路，在第3章再介绍热过程的数值模拟。

2.1 有限单元方法的基本思想

在有限元分析过程中，诸如温度及位移这样的连续物理量将通过有限元网格离散的方式被分段近似，如为了计算一个圆的周长，可以使用这个圆的内接正多边形或者外切正多边形的长度来近似，且多边形的边数越多，结果越接近圆的周长。这里通过正多边形的有限个边来近似代替圆的周长，多边形的每个边都是一个单元。

为了便于理解，这里以弹性问题为例说明有限元分析的基本思想。

首先将弹性体离散为有限个彼此相连且互不重叠的单元。针对二维问题，单元的形式可以是三角形单元或者四边形单元（单元的边可以为直线或者曲线），对于三维问题，单元形式可以为四面体单元或者平行六面体单元。图2-1所示为典型的二维和三维单元。连接单元的点称为节点，节点有时在单元的顶点位置，有时则分布在单元的边上。将连续体划分成多个单元的过程称为离散化，而获得的单元的集合一般称为网格。单元的类型及大小一般基于分析人员的经验。自己编程实现结构的网格划分是一项艰苦的工作，需要综合程序语言以及有限元分析的一些基本原则，才能获得质量比较好的网格，但是对于形状复杂的结构，手动划分网格几乎是不可能的。值得庆幸的是，目前很多有限元分析的商用软件（如 MSC. Marc 和 ANSYS 等）都具备网格自动划分功能，研究人员只要确定正确的划分策略，一般均能获得质量较好的网格。但是，对于一些形状极其复杂的结构，则需要一些专门的网格划分软件诸如 HyperMesh 等。建议前处理在 HyperWork 中进行，然后导入到有限元软件前处理器中（如 Marc 的 Mentat）进行边界条件的加载和设置。

网格划分后，接下来的分析步骤是建立每个单元节点载荷与节点位移之间的关系。这两个量通过刚度矩阵实现联系，即：节点力 = 刚度矩阵 × 节点位移。这个关系对于有限元分析十分重要，也是有限元分析的基础。这些基本概念将在本章陆续介绍。

在获得单个单元的矩阵方程后，将所有单元的刚度矩阵组合在一起，获得整个结构的总体刚度矩阵，这个组合过程称为组装。

实际上，一般情况下，在有限元分析之初已知的变量是单元的节点力，而单元的节点位移一般是未知量，所以为了获得未知量，要对单元节点载荷与节点位移之间的关系进行一定的变换，将刚度矩阵转化成逆矩阵，即：节点位移 = 刚度矩阵的逆矩阵 × 节点力。通过这个关系能够求解出单元的节点位移，进而可以通过相应的关系获得结构的应力分布。

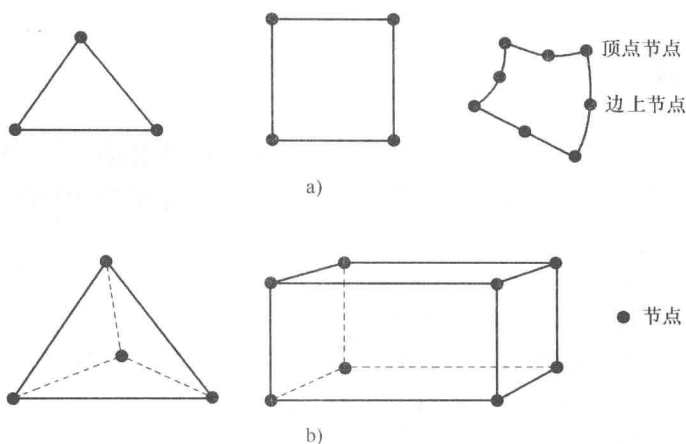


图 2-1 典型的二维和三维单元
a) 二维单元 b) 三维单元 (实体单元)

建立刚度矩阵一般包含两个步骤。首先是建立单元应变与节点位移之间的关系。在此必须事先假设单元中任意点的位移是与其坐标相关的。最简单的关系是假设点的位移与坐标之间呈线性关系，这样就获得了等应变单元。而假设单元内点的位移与坐标之间呈诸如抛物线和三次曲线等高阶的函数关系，则在单元内部的应变是变化的，这样就有可能更加准确地反映单元内应变分布的实际情况。这种单元内部点的位移与点的坐标之间的插值函数关系称为形函数。如果能获得节点的位移信息，就能比较方便地获得相关的应变信息。

建立刚度矩阵的第二个步骤是建立单元节点力与单元内部应力之间的关系。这个关系的建立比较复杂，需要用到诸如虚功原理或者总势能最小原理等理论方法。通常，这两种能量方法是可以互相取代的，一般常用的是虚功原理。

在建立了以上关系的基础上，应对整个单元区域进行积分计算。一般进行直接的积分计算是比较困难的，所以常采用数值解法。这里选用高斯求积法，涉及在单元内部设定特殊的积分点，这些点称为积分点或者高斯点。用该点的函数值代替积分时的相关函数，同时围绕这些积分点选择相应的积分区域，最后应用相应函数值与积分区域的代数和代替积分运算。这里每个积分点对应的积分区域的大小称为权重。

一些对材料科学领域比较重要的有限元的分析理论在本章中没有介绍。其中比较重要的是非线性问题。一般存在两种非线性问题——材料非线性和几何非线性。在外载荷的作用下，变形体的几何形状发生明显变化时会出现几何非线性问题，如拉拔过程、滚弯过程以及深度拉深等过程。理论上讲，这些过程对有限元分析来说是可以解决的。也就是说，通过对于外载荷进行多次渐进加载，如果能保证每次加载过程中的变形不超过预定的值，则每次的计算都可以用弹性分析的办法来实现。

材料非线性也会出现在一些材料变形分析过程中，这些材料随着加载的进行，在不同的方向上其力学性能发生了变化，或者诸如复合材料，其材料起始状态就存在各向异性。这是一个比较复杂的问题，其解决方法是拟合入一些试验的结果，来表征其材料非线性的特点。