

# 铸造过程的 计算机模拟

Computer Simulation for  
Casting Process

侯华 毛红奎 张国伟 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

# 铸造过程的计算机模拟

侯华 毛红奎 张国伟 著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书主要介绍了铸造过程的计算机模拟技术。全书共分5章,主要内容包括绪论,凝固模拟前后处理技术,铸造工艺 CAE 的计算机模拟,铸造工艺 CAD,凝固过程微观组织模拟。

本书可作为铸造领域科研人员在科研及铸造生产中的技术参考资料,也可作为材料加工工程专业研究生及本科生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

铸造过程的计算机模拟/侯华,毛红奎,张国伟著. —北京:国防工业出版社,2008.12  
ISBN 978-7-118-05744-7

I. 铸... II. ①侯...②毛...③张... III. 铸造—计算机模拟 IV. TG24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 070691 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 16½ 字数 330 千字

2008 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 35.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

# 前 言

在我国,制造业已发展成为国民经济的重要组成部分,工业增加值占国内生产总值(GDP)的36%,现居世界第四位。铸造业是制造业的重要组成部分,是汽车、石化、钢铁、电力、造船、纺织和装备制造等支柱产业的基础。我国是当今世界铸件产量大国,产量超过2800万吨,居世界首位。但是我国铸造行业的技术水平与国外相比仍有很大差距,这制约着国民经济的发展。铸造过程的计算机模拟技术是学科发展的前沿领域,是改造传统铸造业的必由之路。

铸造凝固是一个非常复杂的过程,它包括流体的流变、热能的传递,还有其他各种物理化学场的交互作用等,影响因素很多。要模拟这样复杂的过程,就涉及到力学、流变学、传热学、材料物理化学和材料学等各个基础学科,并需要以大量精确的实验,准确地确定所需材料的热物性参数。生产实践中对于数值模拟最基本的要求就是准确,而这又是最难做到的。对于铸造这样的复杂过程进行数值模拟,不进行若干简化是不可能的,但是又难以估计简化带来的误差在工程上是可以接受的还是致命的。此外,有很多问题,虽经许多研究者进行了多年的探索,但至今仍未取得理论和技术上的根本性解决。尤其是涉及凝固过程微观组织模拟的研究工作,仍属于探索阶段,但铸造过程的宏观模拟,流动场数值模拟、温度场数值模拟及铸造工艺辅助设计系统经过20多年的发展,已经可以帮助工程技术人员在铸造工艺设计阶段给出可能出现的各种缺陷并有效预测,从而可优化铸造工艺,确保铸件质量、缩短产品制造周期。

中北大学山西省铸造新工艺工程技术研究中心长期从事铸造领域的计算机应用研究,特别是对铸造过程的宏微观模拟仿真研究,取得了一系列成果。先后完成了国防科工委基础科研项目、总装备部预先研究项目、山西省科技攻关项目、山西省留学基金等有关铸造工程的计算机宏微观仿真研究。其中“大型复杂铝铸件热工艺过程仿真及铸造技术”,2002年获国防科工委科技进步二等奖;“铸造过程仿真及工艺优化技术研究”,2004年获中国兵器工业集团公司科学技术进步三等奖;“铸造工艺过程仿真及应用技术研究”,2007年获山西省高校科

技进步一等奖。此外,研究开发的商品化软件 CastSoft 已经在国内外 100 余家铸造厂推广使用,并获得国际博览会金奖,为企业取得了显著的经济效益。

作者领导的研究机构在这一研究领域已发表学术论文 100 余篇,其中被 SCI、EI 收录 40 余篇,本书是这些研究成果的总结提炼。全书共分 5 章,以铸造工艺 CAE,铸造工艺 CAD,微观组织数值模拟为主要内容,也是本书的核心内容。同时介绍了铸造模拟的前后处理技术。

本书第 1~第 3 章由侯华撰写,第 4 章由毛红奎撰写,第 5 章由张国伟撰写。全书由侯华策划、加工及定稿。编写过程中得到了程军教授及山西省铸造新工艺工程技术研究中心所有老师和研究生的支持和帮助,书中涉及许多企业单位提供的珍贵资料及在企业的应用实例,在此深表谢意。

本书面向铸造领域的科研人员和工程技术人员,也可作为研究生、本科生的教学参考书。

作者

2008 年 10 月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 凝固的重要性 .....	1
1.2 数值计算方法与计算格式 .....	2
1.3 材料凝固数值模拟系统 .....	4
1.4 材料凝固模拟研究的发展现状及趋势 .....	5
1.4.1 计算机凝固模拟技术的发展现状 .....	6
1.4.2 铸件凝固过程模拟发展趋势 .....	7
1.4.3 铸造充型凝固过程数值模拟研究进展 .....	8
1.4.4 温度场数值模拟及收缩缺陷预测 .....	10
1.4.5 微观组织模拟 .....	11
1.5 凝固模拟计算机应用的现状 .....	13
1.5.1 计算机凝固模拟应用的现状 .....	13
1.5.2 计算机凝固模拟取得的成就 .....	13
1.5.3 凝固模拟软件未能快速普及的原因 .....	13
1.6 凝固模拟的进一步研究和发展 .....	15
参考文献 .....	18
<b>第 2 章 凝固模拟前后处理技术</b> .....	20
2.1 网格剖分 .....	20
2.1.1 基于 STL 的网格剖分原理 .....	21
2.1.2 射线穿透法与切片法的比较 .....	26
2.1.3 均匀网格剖分程序开发 .....	26
2.1.4 有限差分非均匀网格剖分 .....	27
2.1.5 非均匀网格剖分的其他方法 .....	34
2.1.6 非均匀网格剖分与均匀网格剖分的比较 .....	37
2.1.7 特殊情况的处理 .....	37

2.2	网格和计算结果文件显示	39
2.2.1	OpenGL 概述	39
2.2.2	STL 模型的变换与显示	44
2.2.3	STL 对接	45
2.2.4	凝固进程动态显示	48
2.2.5	后处理显示问题	49
	参考文献	53
<b>第 3 章</b>	<b>铸造工艺 CAE 的计算机模拟</b>	<b>54</b>
3.1	铸件充型过程模拟	54
3.1.1	充型过程数值模拟的数学模型	55
3.1.2	紊流模型	57
3.1.3	金属液充型过程数值模拟方法	64
3.2	SOLA-VOF 法模拟充型过程	67
3.2.1	数学模型	67
3.2.2	计算模型的离散化	67
3.2.3	速度场和压力场的计算	76
3.2.4	其他问题的处理	88
3.3	流场模拟实验验证	93
3.3.1	模拟软件验证	93
3.3.2	标准实验的模拟(水力模拟实验)	97
3.4	充型过程流场算法的改进	106
3.4.1	针对界面模糊现象的改进	106
3.4.2	流体碰壁时体积函数的分配	109
3.4.3	提高计算效率的方法	109
3.4.4	模拟实际铸件的充型过程	113
3.5	铸件凝固过程中的缺陷预测	118
3.5.1	铸件凝固传热数值模型	118
3.5.2	潜热处理	121
3.5.3	重力铸造下缩孔缩松的预测	126
3.5.4	低压铸造下缩孔缩松的预测	130
3.5.5	上曲轴箱体铸件温度场计算及缩孔缩松模拟	134

3.6 铸件凝固过程数值模拟实例 .....	139
3.6.1 支座铸件温度场计算及缩孔缩松模拟 .....	139
3.6.2 端盖的模拟计算分析 .....	142
参考文献 .....	145
<b>第4章 铸造工艺 CAD</b> .....	<b>146</b>
4.1 铸造工艺 CAD 的内涵 .....	147
4.2 冒口 CAD 系统 .....	148
4.2.1 冒口的设计原则 .....	149
4.2.2 设计冒口的几种常用方法 .....	150
4.2.3 冒口设计分析 .....	156
4.2.4 冒口 CAD 系统的开发 .....	159
4.3 浇注系统 CAD 系统 .....	160
4.3.1 浇注系统设计的基本原则 .....	161
4.3.2 浇注系统各类型及其特点 .....	161
4.3.3 阻流截面的计算 .....	163
4.3.4 确定浇注系统各组元尺寸 .....	166
4.3.5 铸铝浇注系统设计 .....	167
4.4 铸造工艺 CAD 设计实例 .....	174
4.4.1 冒口设计 .....	174
4.4.2 浇注系统的设计 .....	175
4.4.3 设计验证 .....	176
参考文献 .....	178
<b>第5章 凝固过程微观组织模拟</b> .....	<b>179</b>
5.1 微观组织形成的理论基础 .....	179
5.1.1 形核 .....	180
5.1.2 生长 .....	191
5.2 微观组织的数值模拟方法 .....	201
5.2.1 决定论方法 .....	202
5.2.2 随机论方法 .....	202
5.2.3 相场法 .....	204
5.3 相场模型 .....	205



5.3.1	自由能函数法 .....	205
5.3.2	熵函数法 .....	210
5.3.3	单相二元合金相场模型 .....	212
5.3.4	相场模型参数的取值 .....	215
5.3.5	相场模型的初始条件和边界条件 .....	216
5.4	相场模型中的各向异性 .....	216
5.4.1	界面各向异性对平衡形状的影响 .....	217
5.4.2	引入各向异性的相场模型 .....	227
5.4.3	相场方程中各向异性项的离散 .....	228
5.4.4	各向异性对枝晶形貌的影响 .....	233
5.5	相场模型中的噪声 .....	237
5.5.1	扰动的概率分布 .....	238
5.5.2	噪声的引入方法 .....	240
5.5.3	噪声对枝晶形貌的影响 .....	241
5.6	凝固过程中柱状晶与等轴晶的转变 .....	245
5.6.1	形核模型 .....	245
5.6.2	生长模型 .....	246
5.6.3	网格剖分和微观单元温度的确定 .....	247
5.6.4	边界条件和初始条件 .....	249
5.6.5	程序的编制 .....	249
	参考文献 .....	255

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 凝固的重要性

凝固是人人熟悉的一种相变过程。金属熔化时粘度的下降幅度高达约 20 个数量级。因此,不像固态金属那样,在锻造或相似的工艺过程中要消耗很高的能量去克服非常高的流变应力,液态金属的剪切应力基本上等于零。假如铸件的性能更容易控制的话,凝固过程就变得更加重要了。在这方面,凝固理论起着重要的作用,因为它奠定了改善微观组织从而提高铸件性能的基础。

铸造是一种生产途径,但还存在一系列的问题。其中之一就局微观组织随位置而变化,这种变化又导致成分的变化。这样,抗拉强度极限和延伸率等性能都随之发生变化。像一条锁链中最薄弱的环节那样,铸件中的劣质区破坏了整体的完整性。因此对影响微观组织的各种因素要有一个明确的认识,这是至关重要的。较细密的微观组织一般都具有较好的力学性能,而较细密的组织通常是在较高的凝固速率下获得的。这样的速率出现在靠近型壁表面的小尺度范围内以及在薄壁处或在重熔的表面上。

铸造作为一门古老而传统的技术,已经有 4000 多年的历史。我国是当今世界铸件产量大国,2007 年产量已达 2800 万吨,居世界首位。随着发达国家制造业向发展中国家的转移,我国的铸造业必将有更大规模的发展。而我国现在铸造生产总体水平还很落后,全员人均产量不足 4 万元,要从世界铸造大国转变为铸造强国,适应世界经济全球化、快节奏的趋势,必然要采纳新技术,以适应铸造业高质量、低成本的市场需求。铸造过程包含各种传递现象,如热量、质量及动量的传递,以及其他复杂过程。所有这些过程原则上都既可以从微观的原子尺度,也可从连续介质的宏观尺度上去描述。数值模拟的任务即在于建立正确的数学模型,通过恰当的数值方法,利用计算机来求解这些模型,从而得到能反映过程规律、指导实践的结果。

凝固模拟有以下优点:

(1) 铸造工艺师改进工艺设计,提高铸件收得率和质量。长期以来,铸造工艺设计师就有一愿望,即在浇注之前能够调试和改进工艺,直到所设计的工艺方法能获得高收得率、高质量的铸件,再进行实际浇注。凝固模拟技术就有可能提供给铸造工艺设计师这样一个有力的工具,使其可以根据凝固模拟所显示的可能出现的缺陷和位置加以改进直至满意为止。没有凝固模拟这样一个有力的工具,铸造工艺设计师就只能先试浇,浇注完之后根据铸件的具体情况加以改进设计,修改模型。这样,不仅增加了试制费用,而且延长了样件试制周期。如果在正常生产线上试制,还有可能影响正常生产。因此有的铸造厂专门设立了样件试制部门以保证样件的质量和进度,但除了对正常生产影响小以外,试制费用和样件试制周期无显著改进,而且还增加投资和费用。

(2) 吸引客户。凝固模拟软件可以向客户显示如何生产客户的铸件,向客户显示充型过程、凝固过程、铸件在不同时间的截面温度分布,也向客户表明有可能第一次试浇就会成功,因而加快样件试制周期和成品批量交货日期。凝固模拟往往给客户很深的印象。Brusel 公司的 NOVACAST 软件在吸引重要客户时往往产生很好的效果。有一部分铸件之所以能得到订单,部分原因就是凝固模拟软件演示的效果。

(3) 吸引年轻人加入铸造行业。在科技发展日新月异的信息时代,年轻人都希望加入与计算机有关的行业。铸件凝固模拟在一定程度上改善了铸造业的形象,增强了对年轻人的吸引力。因此国内外凡是涉及铸造、凝固的课程几乎都安排了凝固模拟的教学和参观。

另外一个值得注意的情况是随着计算机和 CAD 软件的发展,许多使用铸件的机械工程公司都使用 CAD/CAE 软件来设计产品和铸件,因而用户要求铸造厂也有 CAD 软件以方便相互交流信息,改进设计。如果铸造厂没有 CAD 软件,有时就不被列入铸件供应厂家。这就从另一方面促使铸造厂应用凝固模拟。

## 1.2 数值计算方法与计算格式

金属凝固与铸造过程无论从传热、传质或其他传递过程来讲都是非稳态过程。描述这类过程的偏微分方程绝大部分都无法通过解析法来求解,只能用数值法得到具有一定精度的近似解。

数值法求解实际工程问题的一般步骤大致为:分析实际问题,建立能反映此

问题的物理模型;根据物理模型找出支配过程的主要参数并建立能描述实际过程的基本方程或称数学模型;寻求说明此实际过程的各项单值性条件,如几何条件、物性条件、初始条件、边界条件等;将基本方程所涉及的区域在空间上和时间上进行离散化处理(对空间域的离散又常称网格剖分),使之形成一系列的微小单元或节点;在所有的单元(节点)包括内部单元(节点)和边界单元(节点)上建立由基本方程及定解条件转换而成的数值计算方程组;选用适当的计算方法求解此方程组并将求解过程编制成可供计算机执行的程序,求得计算结果并作适当处理以得到我们需要的各种数据、图形或其他文件。

在根据基本方程建立相应的数值计算方程时,可以有不同求解方法及计算格式。针对凝固与铸造过程的基本方程,常用的数值计算方法有:有限差分法(FDM)、有限元法(FEM)、边界元法(BEM)等。在实际计算中也经常被应用的直接差分法(DFDM)、相交替方向隐式法(ADI)等均可认为属于有限差分法的范畴。在这些方法中,以有限差分法和有限元法应用较多。本书介绍的数值计算方法也主要是这两种。

有限差分法以差分代替微分来处理各类微分方程,概念清晰直观,易于计算,其中的显式格式更在占用内存量与计算时间上具有优点,但其稳定性要求决定了在离散化时对距离步长与时间步长的选用受到一定制约。同时,一般来说,典型的有限差分格式要求对物体作有规则的(通常为正交等距离)网格剖分,使它在模拟复杂或不规则的几何形状时精度受到影响。同属于有限差分范畴的直接差分法突破了这一限制,可对物体作不规则剖分,是其一大优点。

有限元法是基于古典变分法而发展起来的一种计算方法。它可作不规则网格剖分,故能用比 FDM 更少的网格来再现复杂的物体形状。目前有较多的商业化软件可供借鉴或移植也是它的一大优点。由于涉及时间域的离散,它在一定条件下也同样存在稳定性问题。此外,有限元法的计算过程较为复杂,物理概念不如有限差分法明确。

边界元法是使微分方程乘以某个权函数后再对求解空间进行积分。当利用格林公式将方程展开时,如能适当选择权函数,使其中体积分项为 0,则问题就转化成仅仅对边界进行线积分。这意味着利用边界元法可将实际问题降低一维来处理,它也同样对网格剖分没有严格限制,对于稳态问题甚至无须处理内部区域,只须对边界进行分割即可。但边界元法的公式推导及运算过程都比较复杂,计算工作量也较大。尤其对非稳态问题,内部区域仍须网格剖分。总的来说,边界元法仍处于发展阶段,在凝固过程的数值模拟中它的应用不如上述两种方法广泛。

### 1.3 材料凝固数值模拟系统

数值模拟是指利用一组控制方程(代数或微分方程)来描述一个过程的基本参数变化关系,采用数值计算的方法求解,以获得该过程(或一个过程的某一方面)的定量认识,以及对过程进行动态模拟分析,在此基础上判断工艺或方案的优劣、预测缺陷、优化工艺等。

材料凝固是一个涉及物理、流体、传热、冶金、力学等因素的复杂过程。要得到一个高质量的组织性能必须要控制这些因素,而这些因素又是相互影响、十分复杂的,单靠传统的方法、工艺、措施和人为经验控制很难满足生产高水平要求。计算机数值模拟最大限度、多快好省地满足了这些要求。通过计算机数值模拟来确定材料凝固产品设计方案、生产工艺及相关参数、产品缺陷诊断、预测及质量检测。数值模拟使人们进行大量优化设计、方案筛选,从而节省很多人力、物力和时间,具有很大的经济效益。计算机技术和计算材料学的迅猛发展使对充型凝固过程进行数值模拟成为可能,以 CAD/CAE/CAM 技术改造传统铸造技术是行业发展的必然趋势。

铸造凝固过程数值模拟主要涉及两部分,一部分为宏观传输现象的模拟,宏观尺度上(0.1cm~1cm)熔体冷却与凝固,可以用动量、能量及溶质守恒方程来计算。主要是指温度场、充型流动过程及应力场等的数值模拟,可预测铸造过程中的某些缺陷,如缩孔、缩松、热裂及变形等。过去 10 多年来宏观尺度的模拟技术已经比较成熟并进入工程应用阶段。

另一部分是对铸件缺陷、微观组织、力学性能的模拟预测。相对于宏观模拟而言,具体是指在晶粒尺度( $1\mu\text{m}\sim 0.1\text{mm}$ )上对凝固过程进行模拟,可利用晶粒形核和生长的微观模型与宏观三传方程耦合来计算。最近研究表明:材料的性能不仅取决于宏观缺陷,更取决于晶粒尺寸、内部结构和溶质的显微偏析。因此随着数值模拟技术向纵深发展,凝固过程微观组织模拟日趋成为当前材料学科的研究热点。

近 20 年来,国内外都对数值模拟技术在铸造、塑性成型、焊接等热加工领域投入了大量人力和财力,进行了许多方面的研究,也取得了不少的研究成果。

铸造方面计算机数值模拟技术在过去的 20 几年内取得了长足的进步,受到世界各国的重视,科研成果层出不穷,归纳起来主要有以下几个方面:

(1) 温度场模拟。利用传热学原理,分析铸件的传热过程,模拟铸件的凝固过程,预测缩孔、缩松等缺陷。

(2) 流动场模拟。利用流体力学原理,分析铸件的充型过程,可以优化浇注系统、预测卷气、夹渣、冲砂等缺陷。

(3) 应力场模拟。利用力学原理,在温度场的基础上,分析铸件的应力分布、预测热裂及变形等缺陷。

(4) 流动与传热耦合设计。利用流体力学原理,在模拟充型的同时,计算热传,可以预测浇注不足、冷隔等缺陷。

(5) 组织模拟。分宏观、微观组织模拟,根据凝固学原理,利用一些数学模型来计算合金液形核数、枝晶生长速度、组织转变、预测铸件性能。

材料凝固的计算机数值模拟系统主要研究材料在凝固过程中的温度、应力、应变等分布规律以及微观组织、力学、机械及物化性能等的变化情况。根据模拟研究内容的发展,又可分为宏观模拟与微观模拟,前者主要研究宏观塑性变形行为、成型特性、内部孔隙和疏松的压实技术及参数;后者则着重探讨微观塑性变形机制,寻找塑性加工过程中组织性能的变化规律并优化工艺方案和参数。

金属材料凝固过程是十分复杂的高温、动态、瞬时过程,过程开放性差,材料经过液态流动充型、凝固结晶等多种微观组织变化及缺陷的产生与消失等一系列复杂的物理、化学、冶金变化而最后成为毛坯或构件。材料凝固过程数值模拟技术就是通过数值模拟计算,预测实际工艺条件下,材料凝固后所得到的组织、性能和质量,进而实现材料成型工艺的优化设计,实现材料成型由“技艺”走向“科学”,使材料成型技术水平产生质的飞跃。

数值模拟技术在材料凝固过程可起到如下作用:

- (1) 优化工艺设计,使工艺参数达到最佳,提高产品的质量。
- (2) 可在较短的时间内,对多种工艺方案进行检测,缩短产品开发周期。
- (3) 在计算机上进行工艺模拟实验,降低产品开发费用和对资源的消耗。

## 1.4 材料凝固模拟研究的发展现状及趋势

随着计算机硬件和技术的发展,凝固模拟软件取得了很大的进展,世界上出现数十家以凝固模拟软件为主要产品的软件公司。许多铸造企业安装和使用凝固模拟软件,提高了铸件质量,降低了成本。安装和使用凝固模拟软件的铸造

厂的数量在逐步增加。美国已经大量采用计算机模拟仿真方法研究开发导弹、飞机及其发动机、汽车及其发动机等的设计。据报道,采用计算机模拟技术可以缩短产品试制周期 40%、降低生产成本 30% 及提高材料利用率 25%。

#### 1.4.1 计算机凝固模拟技术的发展现状

铸造计算机模拟与仿真是当今国际公认的制造科学与材料科学的前沿领域之一。1996 年美国出台的下一代制造(NGM)计划提出 10 项关键基础技术,其中就包括建模与仿真。铸造模拟仿真研究正在向高性能、高保真、高效率的多学科模拟与仿真方向发展,其重点是由宏观模拟走向微观模拟。另外,质量控制模拟正在向微观组织模拟、性能及使用寿命预测的方向发展。

我国铸造行业率先引入计算机技术的是铸造过程数值模拟领域。沈阳铸造研究所和大连工学院在这一方面做了开拓性的工作。1978 年,在葛州坝电站 125MW 水轮机叶片的铸造工艺研究中,沈阳铸造研究所的张毅、王君卿等人开展了铸件凝固过程温度场的计算机模拟的研究。与此同时,大连工学院的金俊泽等人对大型船用铜螺旋桨的凝固过程温度场进行了模拟分析。此后,哈尔滨工业大学、西北工业大学、西安交通大学、清华大学、华北工学院都先后开展了温度场模拟的研究。从 1982 年开始,大连工学院的郑贤淑、金俊泽等人开始了铸造应力的数值模拟的研究。他们采用热弹塑性力学模型对大型铸件(大型双幅板齿轮、铸钢轧辊、钢锭模)的铸造及热处理应力进行了模拟。此后,西安交通大学、清华大学、哈尔滨工业大学、上海工业大学等也都开展了应力场的模拟分析工作。在铸造充型过程的数值模拟方面,经过几十年的发展,铸造充型过程数值模拟技术已经比较成熟和完善,并进入了广泛的实用化研究阶段。

应力场模拟的研究不断的深入,建立了不同数学模型,如准固相区间流变学模型、固相高温区热弹性塑性模型等。一种新的方法是将 FDM(有限差分法)与 FEM(有限元法)方法相结合,利用 FDM 方法分析流动与传热,利用 FEM 计算应力,这样就发挥了两者的优势,初步成果在一些铸件生产上得以应用。但对于铸造过程热应力模拟来说,目前还处于理论研究阶段,能够准确描述高温状态应力/应变场的数学模型还没有建立,缺乏高温状态合金的物性参数也严重阻碍了应力模拟系统的生产应用。

微观组织模拟在 20 世纪 90 年代成为研究的热点,从液态金属凝固的角度来说,研究方法主要有确定性方法、概率方法和相场方法等。一些研究对球墨铸

铁、铝合金等铸件微观组织形成过程进行了模拟分析,李殿中等人针对航空发动机用高温合金叶片进行了微观组织模拟,取得了可喜的成果。但应看到,微观组织模拟在实际生产中的推广应用还有很长的路要走。

20 世纪 90 年代铸造数值模拟技术研究范围由早期的普通重力铸造发展到低压铸造、压力铸造、熔模铸造、实型铸造、电磁铸造、电渣铸造甚至型砂紧实过程的数值模拟。合金范围也由常见的钢铁发展到铝合金、铜合金、镁合金、钛合金等。这一期间数值模拟技术的另一个巨大成就是温度场、流动场以及流动与传热的耦合计算等技术进入到了实用阶段,出现了铸造模拟商品化软件系统。如中北大学的“CASTSOFT”、华中科技大学的“华铸 CAE”、清华大学的“FT STAR”等。这些系统的性能指标达到了国际同期的先进水平,能够有效地指导实际生产。目前国内有 300 多家铸造企业采用了上述 CAE 系统,如鞍山钢铁公司、东风汽车公司、无锡柴油机厂、航天第三研究院、洛阳矿山机器厂等,都取得了较好的使用效果。另外也有 20 多家企业,包括第一汽车制造厂、四方机车车辆厂等引进了国外的铸造 CAE 软件。目前,越来越多的铸造企业认识到 CAE 技术对于缩短新产品开发周期、减少试制成本、降低废品率具有十分重要的价值。

#### 1.4.2 铸件凝固过程模拟发展趋势

铸件充型、凝固计算机模拟仿真(简称 CAE)是学科发展的前沿领域,是改造传统铸造产业的必由之路。历经数十年努力,铸件充型凝固过程计算机模拟仿真已进入工程实用化阶段,铸造生产正在由凭经验走向由科学理论指导。铸造充型凝固过程的数值模拟,可以帮助工作人员在实际铸造前对铸件可能出现的各种缺陷及其大小、部位和发生的时间予以有效的预测,在浇注前采取对策以确保铸件质量,缩短试制周期,降低生产成本。

铸造 CAE 研究与开发起步于 20 世纪 60 年代,据统计,国外已投入的研究与开发费用达数千万美元。经过几十年的努力,由于在以下三方面取得了重要突破,铸件充型凝固过程计算机模拟仿真在工程上的应用才变为可能与现实:

- (1) 具有能处理三维复杂形体的图形功能。
- (2) 硬件及软件费用大幅度下降到铸造工厂能够接受。
- (3) 计算机操作系统及软件对用户友好(user friendly),一般铸造工程技术人员稍加培训就可独立操作运行。

第一个铸造 CAE 商品化软件于 1989 年在德国国际铸造博览会上展出,以



温度场分析为核心内容,在工作站上运行。20世纪90年代以来,铸造CAE商品化软件功能逐渐增加,但主要都在工作站上运行。国外铸造CAE商品化软件的功能一方面正向低压铸造、压力铸造及熔模铸造等特种铸造方面发展,另一方面又正从宏观模拟向微观模拟发展。

国内虽起步较晚,但进展迅速,目前国内开发的商品化软件的部分功能已与国外软件相当,可以满足铸造工厂的一般需要。宏观模拟研究集中在铸件应力分析及流场模拟方面。铸造过程计算机模拟仿真的研究重点正在由宏观模拟走向微观模拟。微观模拟的尺度包括纳米级、微米级及毫米级,涉及结晶生核长大、树枝晶与等轴晶转变到金属基体控制等各个方面。

### 1.4.3 铸造充型凝固过程数值模拟研究进展

#### 1. 三维造型与有限差分网格划分

在进行铸造过程数值模拟时,首先要解决的问题之一是将CAD平台产生的铸件、铸型等的三维造型模型进行计算单元划分,这是数值分析的前提。国内外研究人员及用户在计算机上都选用AutoCAD建立几何模型,而在工作站上则采用通用的商品化软件包如PRO/E, CADD5, I-DEAS及带有STL文件格式的CAD模块,可以方便地选用STL输出格式作进一步的有限差分网格划分。

#### 2. 铸造充型过程的数值模拟

铸造充型过程在铸造生产过程中起着重要作用。许多铸造缺陷,如卷气、夹渣、缩孔、冷隔等都与充型有关。为控制充型顺序和流动方式以获得优质铸件,对充型过程进行数值模拟很有必要。多数研究以SOLA-VOF(Solution Algorithm)法为基础,引入体积函数处理自由表面,并在传热计算和流量修正等方面进行研究改进。有的研究在对层流模型进行大量的实验验证之后,用 $k-\epsilon$ 双方程模型模拟铸造充型过程的紊流现象。

1987年之前,充型模拟基本上限于二维板类铸件,并假设充型过程液态金属处于层流流动。1987年,在丹麦科技大学的中国访问学者王君卿将二维SOLA-VOF发展成三维计算程序,并加入三维传热计算。他还对比了二维SMAC、SOLA-VOF及SIMPLE算法,结果表明,SOLA-VOF在计算速度上优于其他两种算法,而计算精度无多大差别。1989年,H.J.Lin和W.S.Hwang一起开发出了三维充型数值模拟软件,把MAC和SOLA法结合在一起研究三维流动问题。之后,充型模拟基本进入三维问题的研究。1988年以前,人们对