

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

“十五”国家重点图书

先/进/铸/造/技/术/丛/书

丛书主编 张武城

铸造过程 模拟仿真技术

熊守美 许庆彦 康进武 编 著
柳百成 主 审



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目
华夏英才基金资助项目

先进铸造技术丛书

丛书主编 张武城

铸造过程模拟 仿真技术

熊守美 许庆彦 康进武 编著
柳百成 主审



机械工业出版社

本书全面系统地介绍了铸造过程数值模拟的基础知识、基本特点、关键技术和各种模拟方法以及作者在该领域的研究成果,并阐述了该领域的研究热点和发展趋势。主要内容包括铸造过程数值模拟的相关研究领域:液态金属充型和凝固过程的数值模拟,铸造成形过程中缺陷(缩孔、缩松和热裂等)的预测,铸件凝固过程应力数值模拟及残余应力和残余变形预测,铸件凝固过程中微观组织模拟等。同时,还包括了铸造过程数值模拟的前、后处理以及模拟用材料物性参数等。本书可作为铸造领域科研人员及工程技术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

铸造过程模拟仿真技术/熊守美等编著. —北京:机械工业出版社, 2004.9

(先进铸造技术丛书)

ISBN 7-111-15142-9

I. 铸… II. 熊… III. 铸造-过程-数值模拟
IV. TG2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 084757 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 邝 鸥 版式设计: 霍永明 责任校对: 姚培新

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷

890mm×1240mm A5·13.75 印张·405 千字

定价: 30.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

丛书编委会

丛书主编	张武城			
丛书副主编	李传栻			
丛书顾问	柳百成	陈蕴博		
丛书编委	黄天佑	姜不居	李传栻	毛卫民
	谢成木	熊守美	颜永年	张伯明
	张武城	张乃蕴		
丛书策划	邝鸥			

序

铸造是机械工业重要的基础工艺与技术，广泛地应用于机械制造、航空航天、能源、交通、化工、建筑以及社会生活的各个领域，并随着各相关技术领域的发展自身不断更新、发展和完善，是我们生产和生活中时时不可或缺的一项重要工艺技术。

今天，铸造作为一种传统工艺与技术又面临着新的挑战。高速发展的社会，对铸造的精密性、质量与可靠性、经济、环保等要求越来越高。铸造已从单一的加工工艺发展成为新兴的综合性的先进工艺技术。它涉及到工艺方法、设备及工装、成型、生产过程的自动化与机械化、材料、环保等众多领域。不同学科之间的交叉、渗透及融合，高新技术对传统技术的不断影响，是当代科技发展的重要趋势。

为了解决广大铸造科技人员迫切需要了解和掌握铸造领域各学科的国内外先进技术及发展趋势的要求，以便指导他们的生产、科研及教学工作，北京机械工程学会组织了铸造行业有较快进步和较新发展的数个重要领域中有突出贡献的著名专家、学者编写了这套先进铸造技术丛书。同时，邀请我国铸造、材料业界德高望重的著名专家柳百成院士、陈蕴博院士作为丛书的编写顾问。

本丛书旨在全面、系统地介绍国内外先进铸造技术的发展趋势，对我国铸造技术的发展起指导作用。本丛书是高层次的普及型丛书，深层次地介绍铸造相关领域的高新技术和基本规律，并兼顾知识性和实用性，面向广大铸造工作者、研究人员、高等院校师生及相关领域技术人员等。

本丛书的特点是突出“高、新”二字，有较宽的知识覆盖面，注意相关学科的相互渗透，博采国际、国内最新研究和发展成果。

本丛书编写人员愿为广大铸造技术人员适应国际大环境、大市场的要求，使我国铸造业迅速加入国际经济市场，从铸造大国向铸造强国迈进的过程中作出重要贡献。

北京市发展和改革委员会及机械工业出版社高水平著作出版基金对本丛书的出版提供了经济支持，中国机械工程学会副理事长宋天虎对丛书的出版给予了关心和支持，在此一并表示衷心的感谢。

丛书主编 张武城

前 言

我国是当今世界铸件产量大国，产量超过 1600 万 t，居世界首位。随着发达国家制造业向发展中国家的转移，我国铸造业必将有更大规模的发展。同时，也应认识到我国铸造生产总体水平还十分落后，要从世界铸造大国成为铸造强国，适应当代世界经济全球化、快节奏的趋势，做到市场反应快速、高质量、低成本等还面临着巨大的挑战。铸造过程仿真技术是学科发展的前沿领域，是改造传统铸造产业的必由之路。

铸造过程的模拟仿真技术包括铸件充型过程（流场）数值模拟、凝固过程（温度场）数值模拟、微观组织数值模拟、热应力数值模拟以及铸造缺陷（如缩孔、缩松及热裂等）预测等。历经数十年的努力，铸件充型凝固过程计算机模拟仿真的发展已进入工程实用化阶段。铸造充型凝固过程的数值模拟，可以帮助工程技术人员在铸造工艺设计阶段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，从而优化铸造工艺设计，确保铸件的质量，缩短试制周期，降低生产成本。

铸件凝固过程中的热应力数值模拟涉及凝固过程复杂的传热分析（包括与凝固和收缩有关的界面传热）、随温度和组织变化的力学本构模型、铸件/铸型之间的相互作用和热裂的发生等。铸件热应力模拟可以预测铸件凝固过程中应力和变形的动态变化，在此基础上进行热裂的预测，并对铸件残余应力和残余变形进行分析，为铸件尺寸精度控制提供依据。

目前，铸造过程数值模拟正在由宏观模拟向微观模拟转变，模拟尺度包括微米和毫米级，涉及结晶过程形核长大、柱状晶与等轴晶的转变和金属基体组织的控制等方面。铸件凝固组织形成过程的模拟可以预测铸件的铸态组织和力学性能，获得主要工艺参数与铸件凝固组织的定量关系，为通过工艺控制改善铸件微观组织提供可靠依据。

本书以作者多年来的研究工作为基础,全面系统地介绍了铸造过程中的数值模拟技术。作为北京市机械工程学会先进铸造技术丛书之一,向读者介绍铸造过程数值模拟的基础知识、基本特点、关键技术和各种模拟方法,以及作者在该领域的研究成果,并阐述了该领域的研究热点和发展趋势。

书中第1章为数值算法基础,包括有限差分法和有限元法的基本原理。第2、3、4、5章为本书的核心内容,分别阐述了铸件充型过程数值模拟、铸件凝固过程温度场、微观组织和应力数值模拟。第6章和第7章为材料物性参数和数值模拟的前、后处理技术等。第8章展望了铸造过程模拟仿真的发展趋势。本书涉及的铸造合金包括灰铸铁、球墨铸铁、铸钢以及铸造铝合金等,铸造方法涉及砂型铸造、金属型铸造、低压铸造和压力铸造等。

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

本书的第1、2、3、7、8章主要由熊守美撰写,第2(部分)、4、7(部分)、8(部分)由许庆彦撰写,第1(部分)、第3(部分)、5、6章由康进武撰写。全书由熊守美策划、加工及定稿,由柳百成院士主审。

书中所涉及的研究成果得到了国家重点基础研究发展规划(973)项目(G2000067208-3)的资助。编写过程中得到了柳百成院士课题组教师及全体研究生的支持和帮助,书中涉及许多企业单位提供的珍贵的工艺资料及在企业中的应用实例,在此深表谢意。

本书的出版得到了华夏英才基金的资助并入选“华夏英才基金学术文库”,在此表示衷心的感谢。

编 者

目 录

序

前言

第 1 章 数值模拟技术基础	1
1.1 有限差分法的数学基础	1
1.1.1 有限差分法的基本原理	1
1.1.2 差分方程的构造方法	6
1.1.3 差分方程的相容性、收敛性和稳定性	11
1.1.4 线性代数方程组的数值解法	13
1.2 有限元法的数学基础	23
1.2.1 连续介质的离散	25
1.2.2 形函数	26
1.2.3 高斯数值积分	34
1.2.4 整体集成与求解	36
1.2.5 线性方程组求解中的相关问题	37
参考文献	38
第 2 章 铸件充型过程数值模拟	39
2.1 充型过程的流体力学基础	40
2.1.1 流体的性质	40
2.1.2 粘性流体流动的基本方程	44
2.1.3 初始条件和边界条件	47
2.1.4 紊流	48
2.2 铸件充型过程数值模拟常用方法	55
2.2.1 SIMPLE 算法	55
2.2.2 MAC 技术	58
2.2.3 SOLA-VOF 方法	65

2.2.4	格子气模型	67
2.2.5	自由表面处理方法	71
2.3	SOLA-VOF 法在铸造充型过程数值模拟中的应用	72
2.3.1	SOLA-VOF 数学模型	72
2.3.2	连续性方程和 N-S 方程的离散	73
2.3.3	用 SOLA 法求解速度场和压力场	77
2.3.4	体积函数方程的离散	78
2.3.5	SOLA-VOF 法中自由表面的确定	82
2.3.6	紊流模型的求解处理	83
2.3.7	充型过程温度场的计算	90
2.3.8	其他问题的处理	92
2.4	并行计算技术	97
2.4.1	并行计算技术概述	97
2.4.2	两种主要的并行编程环境——PVM 与 MPI	105
2.4.3	并行计算技术在 CFD 领域中的应用	107
2.4.4	铸造充型数值模拟中的并行计算技术应用	113
2.5	充型过程模拟简化算法	117
2.5.1	变网格方法	117
2.5.2	近表面迭代方法	119
2.5.3	逐层充填简化方法	120
2.6	应用实例	123
2.6.1	倒档伺服器活塞充型模拟计算	123
2.6.2	气缸盖罩盖充型过程模拟	124
2.6.3	阀体充型过程模拟	128
	参考文献	130

第 3 章 铸件凝固过程数值模拟 133

3.1	凝固过程传热学基础	133
3.1.1	传热的基本方式	133
3.1.2	导热微分方程	138
3.1.3	直角坐标系下一般方程的特殊形式	143
3.1.4	导热过程的定解条件	146
3.1.5	凝固过程结晶潜热的处理	149
3.2	求解导热问题的有限差分格式	158

3.2.1	显式差分格式	159
3.2.2	一维导热问题的隐式差分格式	161
3.2.3	二维导热问题的交替隐式差分格式	163
3.2.4	三维导热问题的隐式差分格式	165
3.3	铸件凝固模拟计算区域优化	170
3.3.1	分区计算的基本思想	170
3.3.2	分区计算的实现	172
3.3.3	分区计算的计算效率	174
3.4	铸件凝固过程缩孔、缩松预测	180
3.4.1	铸钢件缩孔、缩松预测	180
3.4.2	球墨铸铁件缩孔、缩松预测	187
3.4.3	压力条件下的缩孔、缩松预测	193
3.5	铸件凝固过程数值模拟工程应用	197
3.5.1	大型铸钢件的补浇工艺优化	197
3.5.2	大型压机上梁铸件工艺优化	199
3.5.3	轮毂球墨铸铁件模拟及其工艺优化	203
	参考文献	204
 第 4 章 铸造合金微观组织的数值模拟		207
4.1	引言	207
4.2	微观组织形成与演变的理论基础	208
4.2.1	金属结晶的热力学条件	208
4.2.2	界面过冷动力学	210
4.2.3	金属结晶的微观过程	214
4.2.4	形核	215
4.2.5	生长	222
4.3	确定性模拟方法	235
4.3.1	共晶合金	237
4.3.2	枝晶合金	240
4.4	Monte Carlo 方法	242
4.5	Cellular Automata 模型	245
4.5.1	CA 方法的基本原理	245
4.5.2	对 CA 方法进行的修正	248
4.5.3	CA 方法模拟枝晶形貌的修正	252

4.5.4 微观组织模拟的并行算法	254
4.6 相场方法	257
4.6.1 相场方程	258
4.6.2 枝晶生长的模拟	260
4.7 模拟验证及实际应用	263
4.7.1 球墨铸铁	263
4.7.2 铸钢	266
4.7.3 铝合金	273
参考文献	276
第5章 铸造过程的应力场数值模拟	278
5.1 热弹塑性模型及其有限元算法	281
5.1.1 热弹塑性模型本构方程	281
5.1.2 热弹塑性模型的有限元算法	287
5.2 准固相区间流变学模型及其有限元算法	289
5.2.1 铸造合金准固相区的流变模型	290
5.2.2 流变学模型[H]-[HIN]-[NIS]的三维本构方程	291
5.2.3 流变学模型的有限元法	292
5.3 热弹性模型的有限差分算法	295
5.3.1 应力的离散化	296
5.3.2 在控制体积上的力平衡方程	306
5.3.3 等效应力的计算	310
5.3.4 方程求解	311
5.4 热力耦合数值算法与集成	311
5.4.1 热力耦合常用数值计算方法概述	311
5.4.2 有限差分/有限元集成热力耦合分析方法	312
5.5 铸件/铸型边界条件处理	316
5.5.1 应力边界条件	316
5.5.2 铸件/铸型边界传热	320
5.5.3 铸件/铸型接触单元算例	321
5.6 基于应力分析的热裂倾向预测	323
5.6.1 基于准固相区热应力的热裂预测研究	323
5.6.2 热裂判据	325
5.7 验证与工程应用	327

5.7.1 应力测试方法	327
5.7.2 应力框试件应力分析	329
5.7.3 应力分析及热裂预测实例——减速箱箱体	333
5.7.4 残余应力分析实例	335
参考文献	341
第6章 模拟仿真用材料性能参数	343
6.1 常用材料性能参数	344
6.1.1 材料热物性参数	344
6.1.2 力学性能模型及参数	346
6.2 参数测量及反算	351
6.2.1 热物性参数的测量方法	351
6.2.2 力学性能的测量方法	353
6.2.3 反算法	357
6.3 材料性能参数对计算结果的影响	360
6.4 材料性能参数的数据库	362
6.4.1 材料性能参数的数据库的建立	362
6.4.2 变物性的插值与回归	363
参考文献	365
第7章 铸造过程模拟仿真前、后处理技术	367
7.1 网格剖分技术	368
7.1.1 STL文件网格剖分基本原理	369
7.1.2 非均匀网格剖分的实现	370
7.1.3 非均匀网格的程序实现	374
7.2 基于网格的后处理显示技术	375
7.2.1 数据文件格式分析	376
7.2.2 目标数据的显示	378
7.2.3 铸件外轮廓线条表示法	385
7.2.4 图像合成技术	389
7.2.5 微观组织模拟结果的显示	389
7.3 基于网格显示技术的改进	398
7.3.1 缺陷数据的透视方法	399
7.3.2 网格数据显示与CAD数据合成显示技术	405

7.4 模拟数据的动画显示	409
7.4.1 常用的动画技术	409
7.4.2 动画的 Windows 编程技术	410
7.4.3 OpenGL 动画的工作原理与实现	411
参考文献	412
第 8 章 铸造过程模拟仿真技术发展趋势	414
8.1 模拟尺度由宏观走向微观	416
8.2 考虑多物理场和多尺度模拟的整体优化设计	420
8.3 并行化、敏捷化、数字化、网络化	424
参考文献	424

第 1 章 数值模拟技术基础

数值算法是铸造过程数值模拟的计算机数学基础。常用的数值算法有有限差分法 (Finite Difference Method, FDM)、有限元法 (Finite Element Method, FEM) 和边界元法 (Boundary Element Method, BEM) 等。新的数值计算方法与技术, 如无单元法 (Element Free Method, EFM)、并行计算技术等不断涌现。数值计算是基于对计算域的离散。不同数值方法对应的计算域的离散方法不同。同时不同数值算法对边界的处理也不同, 计算效率和计算精度也存在差异。总之, 各种方法都有其适用范围, 这也是新方法产生的动力。如在铸造过程数值模拟中有限差分法广泛应用于铸件凝固过程的温度场计算、充型过程数值模拟等方面, 相对来说, 简便实用。而有限元法主要应用于应力分析, 也有用于温度场计算和流动场分析的。本章主要介绍铸造过程数值模拟中应用最为普遍的有限差分法和有限元法的基本原理以及线性方程组的数值解法。

1.1 有限差分法的数学基础

有限差分法 (Finite Difference Method) 是求解偏微分方程的一类主要数值方法。它的基本思想是首先将微分方程问题的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。然后将微分方程的导数用差商代替, 推导出含有离散点上有限个未知数的差分方程组, 将微分方程问题转化为代数问题。最后求解差分方程组以获得微分方程的数值近似解。

1.1.1 有限差分法的基本原理

1.1.1.1 差商的概念

有限差分法依据差商为微商的近似, 微商是差商的极限。二者的

关系可表述如下:

若 $y = f(x)$ 为一连续函数, 定义 y 对 x 的导数为:

$$\frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (1-1)$$

式中, dy 、 dx 分别是函数及自变量的微分; $\frac{dy}{dx}$ 是函数对自变量的导数, 又称微商; Δy 、 Δx 分别为函数及自变量的差分; $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ 为函数对自变量的差商。

从上述定义中, 我们可以看出, 当 $\Delta x \rightarrow 0$ 时, 函数对自变量的差商等于微商。

在差分法中, Δx 总是取某一小的正数。这样, 当用差商代替微商时必然存在一定的误差, 其误差大小为 $\left| \frac{\Delta y}{\Delta x} - \frac{dy}{dx} \right|$ 。

对于一阶导数, 可用以下几种差商近似, 见图 1-1。

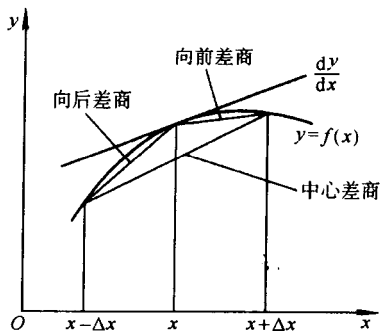


图 1-1 差商与微商

$$\text{向前差商: } \frac{dy}{dx} \approx \frac{y(x + \Delta x) - y(x)}{\Delta x} \quad (1-2)$$

$$\text{向后差商: } \frac{dy}{dx} \approx \frac{y(x) - y(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad (1-3)$$

$$\text{中心差商: } \frac{dy}{dx} \approx \frac{y(x + \Delta x) - y(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (1-4)$$

对于二阶导数的差商, 我们称为二阶差商。可以将其近似为一阶导数的向后差商, 而一阶导数用向前差商近似, 因而有:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} \approx \frac{y'(x) - y'(x - \Delta x)}{\Delta x}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{y(x+\Delta x) - y(x)}{\Delta x} - \frac{y(x) - y(x-\Delta x)}{\Delta x} \\
 &= \frac{y(x+\Delta x) - 2y(x) + y(x-\Delta x)}{(\Delta x)^2} \quad (1-5)
 \end{aligned}$$

1.1.1.2 逼近误差和差商精度

用差商近似微商而带来的误差称为逼近误差。通过 Taylor 级数展开可导出其逼近误差。对于连续函数 $y=f(x)$ 在 $x=x+\Delta x$ 和 $x=x-\Delta x$ 时,分别将其函数值 $y(x+\Delta x)$ 和 $y(x-\Delta x)$ 按 Taylor 级数展开如下:

$$\begin{aligned}
 y(x+\Delta x) &= y(x) + \Delta xy'(x) + \frac{(\Delta x)^2}{2} y''(x) + \\
 & \quad \frac{(\Delta x)^3}{3!} y'''(x) + O[(\Delta x)^4] \quad (1-6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y(x-\Delta x) &= y(x) - \Delta xy'(x) + \frac{(\Delta x)^2}{2} y''(x) - \\
 & \quad \frac{(\Delta x)^3}{3!} y'''(x) + O[(\Delta x)^4] \quad (1-7)
 \end{aligned}$$

式中, $O[(\Delta x)^4]$ 表示展开式后面含有等于或高于 $(\Delta x)^4$ 的所有高阶项, O 表示数量级。同样, $O[(\Delta x)^n]$ 表示展开式后面含有等于或高于 $(\Delta x)^n$ 的所有高阶项, $n=1, 2, 3$ 。

由式 (1-6) 和式 (1-7), 我们可得:

$$\begin{aligned}
 \frac{y(x+\Delta x) - y(x)}{\Delta x} - y'(x) &= \frac{(\Delta x)}{2} y''(x) + \frac{(\Delta x)^2}{3!} y'''(x) + O[(\Delta x)^3] \\
 &= O(\Delta x) \quad (1-8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{y(x) - y(x-\Delta x)}{\Delta x} - y'(x) &= -\frac{(\Delta x)}{2} y''(x) + \frac{(\Delta x)^2}{3!} y'''(x) + O[(\Delta x)^3] \\
 &= O(\Delta x) \quad (1-9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{y(x+\Delta x) - y(x-\Delta x)}{\Delta x} - y'(x) &= \frac{(\Delta x)^2}{3!} y'''(x) + O[(\Delta x)^3] = O(\Delta x) \quad (1-10)
 \end{aligned}$$