

铸造工艺

CAD

及其应用

张 毅 主编
蒋乃隆 主审



机械工业出版社

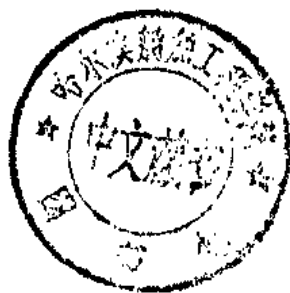
TG248
-29

078882

铸造工艺CAD及其应用

张毅 主编

蒋乃隆 主审



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书总结了我国近十余年来铸造工艺CAD领域科研及应用成果。全书共分十四章,主要包括铸件凝固、应力、热裂的数值模拟;铸造热物理参数;铸件缩孔、缩松判据与预测;浇冒系统CAD;外冷铁工艺CAD、典型铸件工艺CAD;图形生成技术及铸造缺陷分析专家系统等内容,取材新颖、内容丰富,既有基础理论,又有应用实例,理论与实践相结合,适用面广。

本书适合铸造生产、科研与教学人员应用,可供高等学校铸造专业高年级学生及研究生参考,亦可为其它行业在相关领域的科研与生产所借鉴。

01/04/14

图书在版编目(CIP)数据

铸造工艺CAD及其应用/张毅主编,蒋乃隆主审. —北京:机械工业出版社,1994
ISBN 7-111-04138-0

I. 铸… II. 张… III. ①铸造-计算机辅助设计②计算机辅助设计-铸造IV. TG248

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:马明 版式设计:王颖 责任校对:张佳

封面设计:郭景云 责任印制:卢子祥

北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行

1994年11月第1版·1994年11月第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·23.75印张·579千字

0 001—1,400册

定价:30.00元

总结推广计算机辅助设计
的经验成果促进我国
铸造工艺的科学化和现
代化

周尧和
一九九三年八月

中国科学院院士西北工业大学教授，
中国铸造学会名誉理事长 周尧和为本书题字

铸造工艺CAD及其应用编审人员

主 编: 张 毅
副主编: 吴孟怀 相树智 安阁英 金俊泽 葛丰德
 吕孟文
主 审: 蒋乃隆
副主审: 黄校直
编 委: (按姓氏笔划)

王友序 白天申 吴 红 张延威 宋新华
 郑贤淑 郝 远 徐 东 高尚书 崔天真

执笔者: (按章、节顺序)

前 言	蒋乃隆	张 毅		
第 一 章	张 毅	徐雪华		
第 二 章	吴孟怀	吴 红	李殿中	
第 三 章	张佳秋	姜 华	吴孟怀	
第 四 章	崔天真			
第 五 章	郑贤淑			
第 六 章	徐 东	许广济	郝 远	
	徐元斌	张 毅		
第 七 章	高尚书	张延威	张启勋	郝 远
	杜世忠	李德华	白天申	
第 八 章	徐雪华	陈子勇	周宏俊	刘 斌
	张宗炜	吴 红	白彦华	宋新华
	白天申	李德华		
第 九 章	吴孟怀	王友序		
第 十 章	相树智	宁立刚		
第 十 一 章	吕孟文	苏士方	张 毅	
第 十 二 章	白天申	李德华	张宗炜	宁立刚
	吴士平	尚彦凌	相树智	吴 红
	张大坤			
第 十 三 章	许广济	丁雨田		
第 十 四 章	相树智	宁立刚	郝 远	杜世忠
附 录	张佳秋			

前 言

铸造工艺设计是铸造生产的基本组成部分和关键环节,长期以来多是靠经验的积累。虽然近代凝固理论研究已有重大进展,但将其用于具体铸造工艺设计实践还需赖以CAD这一桥梁。自从计算机问世以来,就以其无与伦比的技能逐步深化与扩展到各方面的科研与生产。在铸造领域中具有划时代意义的就是铸造工艺CAD。它预示着铸造工艺的一场巨大变革与飞跃。随着计算机技术的飞速发展,铸造工艺CAD越来越受到重视。为适应社会生产的需要,“六五”和“七五”期间分别将《大型铸钢件凝固控制》和《大型铸钢件铸造工艺CAD》列为国家重点科技攻关项目。由所、校、厂组成联合攻关组,进行科技攻关。攻关组组长和各单位课题负责人为:沈阳铸造研究所张毅,大连理工大学“六五”郭可训、“七五”金俊泽、西北工业大学“六五”周尧和、“七五”张延威、沈阳工业大学“六五”宋新华、“七五”黄校直、哈尔滨工业大学安阁英、哈尔滨科技大学葛丰德、第一重型机器厂相树智。

本书取材于近十余年来铸件凝固与铸造工艺的相关科研成果,特别是“七五”攻关大型铸钢件铸造工艺CAD突破性进展的成果。在编写过程中,又将清华大学球铁CAD和甘肃工业大学灰铁CAD成果纳入,特定名为《铸造工艺CAD及其应用》。这是一本内容崭新,无前例可借鉴的专著,它必将为我国铸造工艺CAD进一步发展和推广应用开拓广阔的新途径,从而使之登上一个新台阶。目前,该领域的研究一般包括凝固进程模拟、应力和裂纹数值模拟、缺陷判据与预测、浇冒系统设计、图形处理及典型工艺等。本书即按这一范畴而编写的。书中的基本内容可供直接应用,部分内容需经完善后方可直接应用,个别章节仅提供了数学模型,但观点新颖,为今后该领域的发展奠定了可靠的基础。

本书可供铸造工程技术人员应用,和高等院校铸造专业高年级学生和研究生学习参考;也可作为其它行业在相关领域科研与生产的应用和借鉴。

本书是在机械工业部科技司蒋乃隆高级工程师倡议和组织下编写的。在编写过程中,承蒙机械工业部科技司的大力支持;中国科学院院士、61届世界铸造学会执委会主席、本攻关组技术顾问、西北工业大学周尧和教授的推荐;得到本攻关组技术顾问、第一重型机器厂前副厂长副总工程师韩玉斌先生和中国铸造学会前秘书长、沈阳铸造研究所前总工程师谢明师教授的关心和支持;得到沈阳工业大学、甘肃工业大学、大连理工大学、西北工业大学、哈尔滨工业大学、哈尔滨科技大学、清华大学、第一重型机器厂及沈阳铸造研究所等单位的热情支持和部分资助,谨在此一并表示感谢。

由于水平所限,书中难免有不当之处,恳请读者给予指正。

编著者

1993年8月

目 录

前 言

第一章 绪论1

第一节 铸造工艺CAD的由来.....1

第二节 铸造工艺CAD的发展.....4

第三节 铸造工艺CAD研究的展望.....6

参考文献7

第二章 铸件凝固进程数值模拟9

第一节 有限差分法9

第二节 铸件凝固单值性条件处理.....20

第三节 有限元法.....37

第四节 边界元法.....42

第五节 凝固传热综合模型.....46

第六节 凝固过程宏-微观统一模型50

参考文献.....53

第三章 铸造热物理参数55

第一节 激光脉冲法热物理参数测试原理.....55

第二节 非稳定热线法热导率测试原理.....57

第三节 数值反算法的测试与计算.....59

第四节 低合金铸铁和保温材料热物理参数测试.....64

第五节 热物理参数数据库.....68

参考文献.....70

第四章 铸钢件的缩孔缩松判据与预测71

第一节 概述.....71

第二节 $G_T/\sqrt{V_c}$ 缩松判据及应用.....78

第三节 缩松判据(V_c/G_T) H81

参考文献.....87

第五章 铸造应力的数值模拟.....88

第一节 概述.....88

第二节 程序设计基本思路.....90

第三节 弹塑性力学15个基本方程.....91

第四节 考虑热负荷的应力应变关系.....96

第五节 增量有限元法的变分原理100

第六节 框形铸件的热弹塑性分析105

第七节 热处理铸件的铸造应力107

第八节 空心轧辊类铸铁件110

第九节 轮形类铸件114

第十节 钢锭模结构优化设计119

参考文献123

第六章 铸件热裂的数值模拟125

第一节 热裂研究的回顾与展望125

第二节 铸钢的高温流变行为129

第三节 铸钢高温流变本构模型135

第四节 型砂高温力学行为的实验方法和性能140

第五节 型砂高温应力-应变本构关系.....148

第六节 铸钢件热裂的预测153

第七节 大型铸钢件热裂控制及工艺159

参考文献163

第七章 浇注系统CAD165

第一节 浇注系统CAD基础165

第二节 铸钢件通用浇注系统设计171

第三节 铸钢件通用浇注系统CAD180

第四节 缸体铸件浇注系统和铸型充填过程的物理模拟187

第五节 铸钢件阶梯式浇注系统循环逼近设计191

第六节 灰铸铁件底返雨淋式浇注系统的水力模拟与CAD197

第七节 球墨铸铁件浇注系统CAD203

参考文献212

第八章 冒口系统CAD213

第一节 三次方程法冒口设计213

第二节 点模数法冒口设计215

第三节 点热阻法冒口设计223

第四节 保温冒口设计229

第五节 球铁件无冒口设计231

第六节 球铁件浇冒口设计238

参考文献249

第九章 外冷铁工艺CAD250

第一节 外冷铁工艺CAD基础250

第二节 外冷铁工艺设计软件系统	254	第十二章 典型件铸造工艺CAD	314
第三节 外冷铁工艺 CAD 实例	257	第一节 曲轴铸造工艺设计	314
参考文献	262	第二节 轮形件铸造工艺设计	319
第十章 铸钢件补缩系统计算	263	第三节 阀体铸造工艺设计	327
第一节 概述	263	第四节 叶片铸件铸造工艺设计	332
第二节 铸件几何模数的计算	263	第五节 机架铸件铸造工艺设计	335
第三节 临界模数梯度值的计算	267	参考文献	338
第四节 工艺模数和等效模数的计算	268	第十三章 铸造缺陷分析专家系统	339
第五节 最大补缩距离的核算	269	第一节 概述	339
第六节 外冷铁工艺及应用	270	第二节 铸造缺陷分析专家系统	343
第七节 冒口的计算	272	第三节 铸造缺陷分析专家系统的 运行实例	351
参考文献	274	参考文献	353
第十一章 图形生成	275	第十四章 铸造工艺参数及数据库	354
第一节 计算机绘图概述	275	第一节 铸钢件通用工艺参数	354
第二节 二维图形生成	276	第二节 铸造工艺数据库的设计	360
第三节 三维图形生成	288	参考文献	365
第四节 接口软件	292	附录 铸造常用材料的热导率和比热容	366
第五节 图形库	311		
参考文献	313		

第一章 绪 论

随着计算机技术的不断发展,计算机在铸造中的应用越来越广泛。计算机技术的引入,使铸造工艺 CAD 系统逐渐形成。铸造工艺 CAD,一般认为是计算模拟、几何模拟和数据库的有机结合,是利用计算机辅助铸造工作者优化铸造工艺,预测铸件质量,确定铸造方案,估算铸件成本,显示并绘制铸造工艺图、工艺卡等技术文件。将计算机的快速、准确和工艺设计人员的经验、思维、综合分析能力结合起来,可以缩短工艺设计周期、提高设计水平,有利于提高产品质量和更新换代,以及提高产品的市场竞争能力,具有显著的经济效益。铸造工艺CAD的研究与应用,最终目的是要使我国铸造工艺科学化、现代化,以期尽可能地以最少的人力、物力,以最高的效率获得质量最优的铸件,其意义深远。

第一节 铸造工艺CAD的由来

一、数值模拟技术的产生及其在铸造上的应用

铸造历史悠久,但在很长一段时间内,铸造技术只是一种手工艺经验的积累,生产方式停留在手工作坊阶段。直到近代,随着生产机械化的发展,对铸件的需用量越来越大,其生产规模不断扩大,手段不断更新,逐渐成为一种工程技术。但至今,严格的科学体系仍未建立起来,原因在于铸件形成过程涉及熔融金属流体力学、弹塑性力学、物理化学、结晶学、传热学及凝固学等多种学科,科学地分析研究铸件形成过程需要相应的实验观察及数理分析手段,而这一手段目前尚不完备。

大部分铸造缺陷产生于凝固过程。揭示金属凝固的真实行为和规律是铸件形成过程理论研究的目的是内容。近代对铸件形成过程理论的研究主要从两方面着手^[1]:一是从金属学观点出发,着重考察液态金属的形核和生长、溶质再分配及结晶动力学与热力学,以掌握结晶组织生成规律,从而控制金属性能进而开拓新材料。二是从传热学观点出发,着重研究铸件-铸型的传热过程。不管从哪一方面着手研究,都应先建模型,再根据不同的条件进行实验和求解。长期以来,由于受实验和计算条件的限制,只能根据简化条件获得定性分析或解析解。本世纪40年代以来,数字计算机的诞生及计算机技术和数值计算方法的不断完善,使得计算机对实际物理过程的数值求解成为可能。用计算机求解物理过程的数值解即是计算机数值模拟。把计算机技术和数值计算方法引入铸造领域后,出现了铸件凝固数值模拟,可对复杂铸件的凝固传热过程进行定量描述。铸件凝固进程数值模拟按数学模型可分为两种类型,一种是以 Chvorinov-Wlodawer 法则为基础,另一种是以导热偏微分方程为基础的数值模拟。

(一)凝固补缩系统的数值求解

在凝固补缩系统方面^[1],最早确定定量概念的是 Chvorinov,他在40年代初提出凝固时间平方根定律,至今仍有一定的指导意义。50年代 Taylor、Adams 等对平方根定律作了补充,确定了冒口设计计算的基本方法;60年代 Robert Wlodawer^[2]在上述基础上进一步

扩展,以顺序凝固为原则,建立了模数的概念,导出温度梯度、补缩效率、补缩距离、补贴和冷铁等一系列问题的定量或半定量法则,形成 Chvorinov-Wlodawer (简称C-W) 体系;70年代,Ruddle把C-W体系的冒口计算方法发展为三次方程形式^[3],根据铸件的模数和被补缩部分体积可直接得出冒口尺寸。此后,对凝固补缩系统的研究形成了两个分支^[1]。一是向生产实用化方面扩展,根据C-W体系建立工艺设计指导资料,工业发达国家各工厂均有自己的系统图表和经验系数。例如德国的莱茵钢厂(生产大型410t机架)和西马克钢厂、日本室兰公司及英国Foseco公司均以C-W体系为依据来指导生产。二是向学科研究方面深化扩展,以德国阿亨工业大学铸造研究所为代表,将凝固补缩深化为凝固形貌、补缩通道、枝晶补缩、铸型铸件间气隙以及缩孔和缩松的特性而进行系统研究。在凝固形貌方面^[4],细化为外生光滑壁、外生粗壁、外生海绵状、内生壳体及内生糊状。在补缩方式方面,细化为液体补缩、质量补缩、枝晶间补缩、充填补缩及固体补缩。

(二)温度场的数值模拟

以导热偏微分方程为基础的铸件凝固数值模拟始于60年代^[1]。1962年,丹麦的Forsund首次使用有限差分法对铸件凝固的传热过程进行了数值计算。三年后,美国通用电气公司的Henzel和Keverian应用瞬态传热通用程序对重达9t的大型铸钢件汽轮机内缸进行了数值模拟,计算温度场与实测温度场吻合良好。这些初步尝试引起了美国铸造学会传热委员会的重视,1966年制订了一项长远规划。根据这一规划,密执安大学以Pehlke教授为首从1968年开始研究,相继以显式有限差分、交替隐式和Saul'yev有限差分格式相比较,而建立数值计算模型,对T型、L型低碳钢进行计算,给出了温度场、等温线和等时线分布图,并与实测结果相比较基本一致。随后将这一方法用于实际铸件的凝固模拟研究,如轴对称铝合金铸件及带法兰铜合金铸件的凝固过程温度场计算等。计算中作者假设:①铸件在凝固过程中其压力为常数;②铸件密度不随温度变化;③金属液瞬间充满铸型;④金属充满铸型后无液相流动和固相移动;⑤铸件/铸型紧密接触,铸型中只有热传导。研究指出^[5],热物理参数(特别是砂型的热物理参数)对模拟精度影响极大,由此导致了热物理参数测试专题研究。研究还发现,正确掌握铸型和铸件之间的气隙,适当处理气隙中的传热方式和热阻的大小至为重要,由此导致了后来开展的铸型胀缩和移动规律的专题研究^[5]。

70年代以来,继美国之后,各国相继开展了有关凝固数值模拟的研究,理论和应用研究各具特色。值得一提的是,日本在较短的时间内广泛开展了该领域的基础研究并使之与应用紧密结合。

大阪大学大中逸雄针对有限差分法的弱点提出了直接差分法,其基本思想是直接从物理概念出发,建立单元间的物理量守恒方程式,单元的形状可以是任意的,从而使直接差分法兼有有限元法的一些优点,可对任意复杂形状的铸件进行模拟。

东京大学的梅田高照^[6]将工程中的边界元法引入凝固计算,并对L型、T型等简单形状铸件进行了温度场计算与缩松预测。

日本东北大学的新山英辅等人在促进凝固数值模拟技术的理论和实用化方面做了大量工作,提出了拟三维计算方法和缩孔、缩松预测判据,开发了简易实用的二维凝固模拟软件,可用于一般铸件的凝固计算,随后又在大型计算机上开发了三维凝固模拟软件。此外,日本铸锻钢公司、日本制钢公司、三井造船公司和三菱重工公司等都开展了相应的研究,目的是预测铸件的缩孔、缩松及宏观偏析等缺陷。川崎重工公司将有限元法用于凝固模拟计算,通

过计算铸件各部分冷却速度来预测铸件各部分强度、硬度。石川岛播磨公司针对铝合金精密铸造特点,严格考虑铸件外表面对外放热的边界条件进行凝固数值模拟。

随着凝固模拟技术的广泛应用,液相流动因素对铸件凝固的影响越来越受到人们的重视。为此,大中逸雄等人对钢锭的液相流动及压力场进行了数值模拟,在考虑液相溶质扩散及液相自然对流的条件下对定向凝固铸锭和大型铸钢锭的液相流场及宏观偏析进行了模拟。

此外,加拿大、原苏联、印度、埃及等国家也相继开展了研究。

我国的数值模拟研究始于70年代末,1979年全国铸造学会在大连举行了我国第一次凝固理论基础研讨会。会上西北工业大学周尧和、沈阳铸造研究所张毅分别作了“铸件凝固理论发展概况”及“铸件凝固电子计算机数值模拟”的重点发言,对我国凝固理论的深入研究,电子计算机数值模拟及CAD的发展起了推动作用^[23]。继之,大连理工大学郭可功、金俊泽,高钦等人及沈阳铸造研究所张毅,王君卿、杨恩长等人分别发表了这方面的论文。他们提出了凝固过程基本传热数学模型、边界条件、潜热及界面间隙等传热基本问题的处理方法,奠定了我国铸造数值模拟研究的基础。

沈阳铸造研究所较早将凝固数值模拟应用于大型铸钢件凝固控制^[9],用有限差分法对水轮机叶片凝固温度场进行了计算和验证。经十多年的研究,开发了一系列软件。以结晶形貌与凝固前沿的温度梯度及生长速度为根据,形成缩孔缩松判据。以枝晶间流动是否顺利为根据,形成枝晶间缩松判据。舍去铸型,采用铸型铸件温度比例及铸型铸件温差函数法来处理边界条件。以轧钢机机架及汽轮机缸体为例,进行三维实体造型、不等空间及时间步长三维自动剖分和计算、动态显示及外冷铁研究,从而实现铸造工艺计算机辅助设计^[10]。从能量、质量、动量守恒定律出发并考虑液相自然对流和枝晶间滤流对凝固进程的影响,建立三维温度场数学模型,可获得温度场、压力场、温度梯度场及固相率场。将液体金属视为不可压缩流体并考虑其处于连续流动及温度的影响下,进行液体金属充型流速场数值模拟。采用水力模拟实验阶梯式浇注系统,进而编制程序进行电子计算机浇注系统辅助设计。把铸件凝固宏观模型与微观模型统一起来,重点放在微观上,计算形核、生长及二次臂距,并定量地建立起组织性能与微观参数关系式,进行等轴晶微观组织模拟^[12]。提出点热阻新概念,确定了热节模数增大系数,进行凝固进程二维计算,实践证明是一种简易实用的凝固模拟方法。

大连理工大学经过十多年的研究,开发了一大批应用软件。在数值模拟基础上,以铸件凝固进程的凝固前沿和热节点移动及动态凝固收缩为依据,建立冒口优化原则,对钢锭模帽部结构进行了优化设计。对不同边界条件下的数值模拟分别进行了研究,开发了连铸钢坯凝固进程数值模拟软件、含内冷铁铸件凝固模拟软件^[13]、湿型铸件凝固进程数值模拟软件。用热弹性方法分析了铸造应力场在凝固、冷却过程中的动态热应力,用有限元法对应力场进行了计算,并应用此方法对大型铸钢轧辊的铸造及热处理应力的形成及变化过程进行了数值模拟^[14]及其基础性研究,如三维计算方法的研究^[15]、激冷型界面气隙的研究、铸型/铸件传热系统中铸型自适应网格剖分的研究^[16]和连铸热工过程的数值模拟与热/力模拟研究等。

哈尔滨工业大学最先对合金凝固过程中的溶质再分布规律进行了数值模拟研究^[17,18],从能量守恒、溶质质量守恒及动量守恒等原理出发,建立了统一的综合数学模型^[18],对合金铸锭凝固的传热、传质、液相自然对流、枝晶间流动过程及铸锭宏观偏析进行了数值模拟分析。还对铸件凝固缩孔、缩松数值模拟预测、拟三维计算、变时间步长计算方法、数值模拟实用化以及铸型物性值测定和铸件凝固气孔预测^[58]等方面进行了研究。此外,还对凝固

数值模拟中的有限元法、外节点直接差分法进行了分析研究,并以热弹塑性应力本构关系及流变学原理为指导,进行了热裂成因数值分析^[21]。

西北工业大学^[22]对铸锭凝固的宏观偏析、沟槽偏析及数值方法等进行了数值模拟研究。

哈尔滨科技大学^[23]对激冷条件下铸件凝固过程进行了数值模拟并研究了激冷工艺参数对铸件凝固的影响。

西安交通大学用直接差分法编制了二维和三维铸件凝固温度场模拟软件,并在大型铸钢锭及离心铸造等方面进行了应用研究。

清华大学^[24,25]近年在铸件/铸型界面换热系数测定与研究、铸件三维实体造型、铸件凝固缩孔缩松预测等方面进行了深入研究。

沈阳工业大学、甘肃工业大学等也在铸件凝固模拟、冒口优化设计等方面开展了各具特色的研究。

80年代初,由沈阳铸造研究所、大连理工大学、西北工业大学、沈阳工业大学、哈尔滨工业大学、哈尔滨科技大学和第一重型机器厂组成联合攻关组,完成了国家“六五”重点科技攻关项目“大型铸钢件凝固控制”专项研究,为以后凝固过程数值模拟及相关技术的深入研究奠定了基础,在凝固数值模拟实用化方面迈出了可喜的第一步。

二、铸造工艺CAD的产生

进入80年代,凝固数值模拟研究形成了世界性热潮,CAD在铸造领域尚处于萌芽阶段、国际第50届铸造会议(1983年)在凝固数值模拟专题讨论会上,美国密执安大学Pehlke教授及佐治亚工业大学Berry教授的报告中提出铸造工艺CAD的概念,并把它归结为计算模拟(CALCULATED SIMULATION)、几何模拟(GEOMETRICAL MODELLING)和数据库(DATABASE)的有机结合。丹麦技术大学HANSEN教授提出前处理(PRETREATMENT)、后处理(POST-TREATMENT)和中间计算的概念。阿亨工业大学铸造研究所以Sahm教授为首,提出了研究“使用性能-组织结构-工艺方法”的可行性报告,其中列出了一系列定量关系式,将铸件模数、凝固速度、结晶参数、溶质分配系数和枝晶臂距等有机地联系起来,以实现铸件结构、材料性能和铸件形成过程的计算机辅助设计。

我国将“大型铸钢件铸造工艺CAD”纳入了国家“七五”重点科技攻关计划。经五年努力取得了重大成果。

第二节 铸造工艺CAD的发展

一、铸造工艺CAD在国外的展

美国在国家科学基金会赞助及美国铸造学会传热委员会的支持下,组成由佐治亚工业大学Berry教授和密执安大学Pehlke教授主持的联合科研组,开展系统研究,长远目标是实现铸造工业计算机辅助设计。系统研究分为以下几类:①铸型物性值;②铸件/铸型接触热阻;③铸件在凝固收缩过程中的补缩现象;④凝固过程中的流体流动现象;⑤利用通用传热计算程序的可能性;⑥通用几何模型程序和凝固模拟程序的联接。

针对上述问题,Pehlke等人^[26,27]对铸件收缩、型壁移动及界面气隙形成过程进行了研究和测定,Berry等人围绕液态金属的对流及补缩行为进行研究。将液态金属的对流分为充型过程的强制对流和充型后凝固前的自然对流,并对两种对流形式分别进行数值模拟,指

出对厚大截面, 自然对流对温度场及凝固的影响是不容忽视的。Pittsburgh大学的Stoehr^[28]在铸件凝固模拟程序与几何模型程序的联接方面作了初步尝试, 并对金属液在型腔内的流体流动现象进行了数值计算。

美国的一些公司和大学还进行了应用软件的开发。Abex 公司用差分法在 VAX 机上开发了三维凝固传热模拟程序, 软件操作方便, 计算速度快, 计算结果采用立体彩色显示, 是较为实用的软件之一。Corbett^[34]研制了名为 Solstar 的微机系统三维热分析模拟软件, 可完成实体造型、体积、重量计算、缩孔、缩松预测, 是目前美国应用水平较高的软件。

随着研究的深入, 人们开始对凝固过程的微观现象进行数值模拟研究。Rider 等人对连续铸锭的液相自然对流、枝晶间流动、溶质分布及温度场进行了模拟计算, 得出符合实际的铸锭宏观偏析结果。Maples 等人将水平凝固的铸锭分解为纯液相区(自然对流)、固液共存区(枝晶间滤流)和末端凝固区、按各区液相流动规律的不同, 分别计算其传热、传质过程。

此外丹麦、芬兰、瑞典、挪威及冰岛 5 个北欧国家组成联合科研组, 1985 年开始工作, 第一阶段专门研究温度场模拟, 第二阶段扩展为计算机辅助设计及组织性能模拟。

二、铸造工艺CAD在国内的发展

原“六五”科技攻关组继续承担了国家“七五”重点科技攻关课题“大型铸钢件铸造工艺CAD”的研究, 内容概括见图 1-1。此外亦有某些高校、研究所及企业进行有关CAD 的开发研究工作。“七五”攻关选择了五类铸件: 曲轴代表轴类铸件; 轧机机架代表框架类铸件; 齿轮代表轮形类铸件; 叶片代表板类铸件; 缸体阀体代表复杂结构的壳体类铸件; 结构上基本覆盖了各类铸件。材质有球铁、碳钢、低合金钢及高合金不锈钢。零件装机运行工况有大的静载荷、高中速旋转的动载荷以及高温高压下的各种载荷。铸件重量从几吨到数百吨, 断面尺寸大至 1000mm×1000mm 以上, 在行业中有很大代表性。攻关中研制了十余种软件, 其中包括各类产品零件CAD软件、通用软件及数据库软件。

攻关组在应用技术和学术理论上取得以下成果:

(1) 曲轴类CAD 可通过人机对话输入零件图, 进行工艺设计。该软件已在 295 柴油机曲轴的铸造工艺设计上应用。

(2) 轮形类CAD 包括 276 种结构, 基本覆盖了机械中各种齿轮及很多环形铸件。软件可绘制详尽工艺图并直接用于生产, 现已在许多工厂应用。

(3) 机架类CAD 已生产出中英合作的大型铝板轧机机架, 铸件重 110t, 质量符合戴维-麦基公司和日本三菱重工标准, 相当于 ASTM 一级品, 产品已在秦皇岛铝厂投入运行。

(4) 缸体类和阀体类CAD 可进行典型工艺设计和优化工艺设计, 所绘制的复杂工艺详图, 在铸造CAD领域是首例。

(5) 叶片类CAD 工艺设计效率可提高10倍, 适用于各种尺寸、重量的卡普兰式叶片。

上述各类专用CAD中均具有设计计算和数值模拟检验及电脑试生产的功能。各通用软件的成绩和突破点如下:

(1) 浇注系统CAD 水力模拟与CAD相结合, 可观察流态计算流量, 控制溢流, 优化浇注系统设计。

(2) 冒口CAD 打破历来模数法不能观察凝固过程的弱点, 提出点热阻和动态点模数以及模数梯度的概念, 创造出新型冒口设计方法, 简单易行, 可优化冒口亦可显示(二维)凝

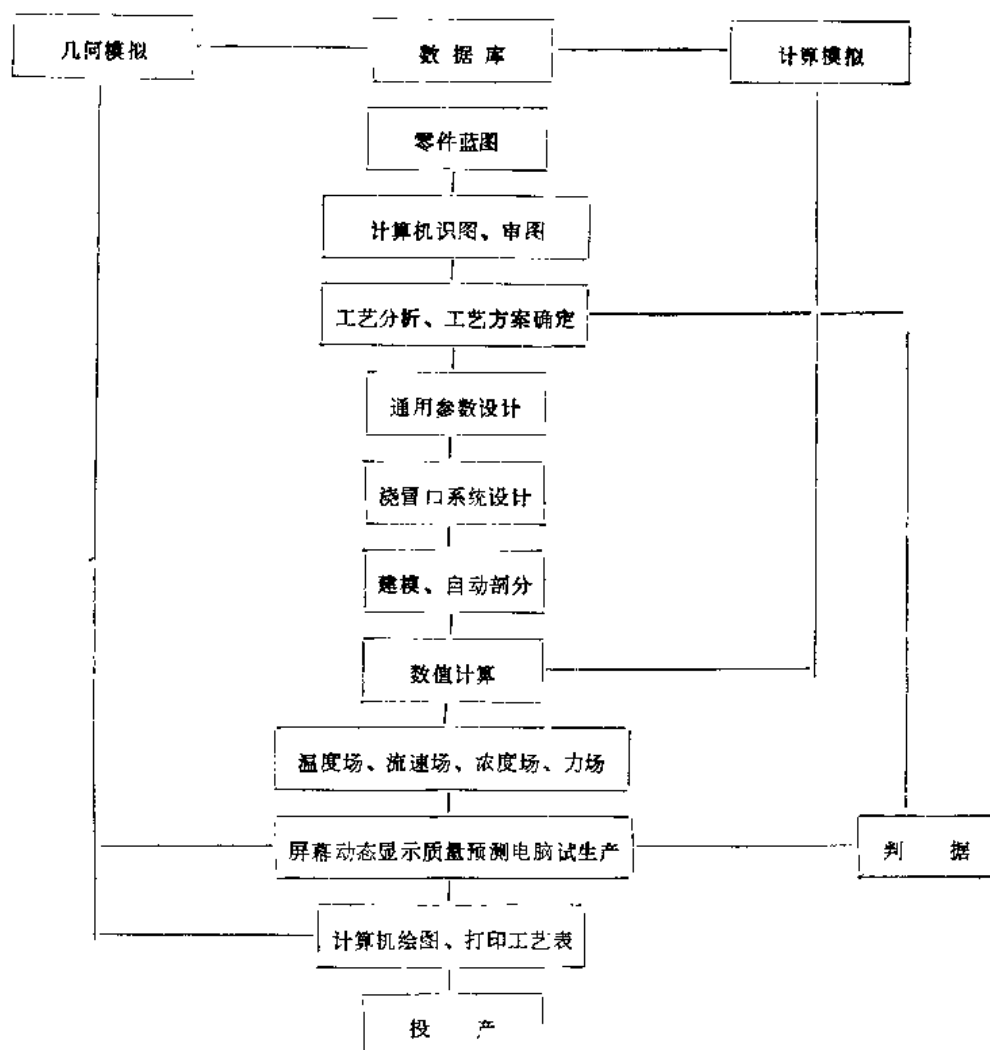


图1-1 铸件凝固数值模拟和铸造工艺CAD系统方框图

固进程。

(3) 裂纹CAD 以高温力学模型为基础, 建立强度因子判据, 计算高温应力, 预测冷裂, 加入经验因素推算热裂。以流变学为指导, 建立本构方程模型, 开创铸钢热裂新的研究方向。

建立的通用工艺参数数据库和热物理参数数据库具有很大的覆盖面。热物理参数测试方法在铸造领域属国内外首例, 可用于金属、非金属造型材料等各种材料的热物性值测试。

(4) 缩松判据 纳入各项相关因素而建立多元函数关系, 参数因素之多, 前所未有的。

(5) 通用凝固过程数值模拟 描述了铸件成形的过程, 实现了立体造型、不等几何步长自动剖分、不等时间步长计算、动态显示, 可适用于任何铸件, 与铸件材料和造型材料的热物理参数相结合, 可用于任何铸件的凝固模拟计算。

第三节 铸造工艺CAD研究的展望

目前铸造工艺CAD的研究与应用, 已达到一定的水平, 但仍存在着一些阻碍其发展的因

素,主要有以下几方面:

1.铸件凝固的物理、数学模型

用热传导模型来分析铸件的凝固行为而忽略了液态金属充型、凝固过程中的液相流动、固相移动、溶质偏析以及枝晶间力学行为等因素对合金凝固的影响,无疑会使凝固模拟的精度受到极大的影响。

2.计算方法及可靠性问题

对复杂过程的三维模拟,存在着数值方法的适用性、精度保证和网格划分等一系列方法问题。对于一些大型计算,还存在着效率问题。

3.物性值问题

铸造金属材料 and 铸型材料的物性值及其随温度变化的规律,直接影响凝固模拟结果的精确性,随着研究的深入,液态金属和铸型材料的高温物性值也越来越为人们所关注,而实际生产工艺的复杂性又为这一问题的解决增加了难度。

4.计算机软硬件资源的限制

目前,在铸造工艺CAD实施过程中,往往受计算机软、硬件资源的限制,尤其是在我国,工程CAD软件资源尚不丰富。国际上,能运行大型CAD软件的工作站系统尚不能完全兼容,不利于工作站用户博采众长得到丰富的CAD资源。研究人员还需解决来自计算机技术本身以及几何模型等方面的问题,这个问题将随着计算机技术本身的发展和软、硬件资源环境的改善才能逐步解决。

因此,建立更加全面、完善的凝固过程综合数学模型;探讨寻找新型、可靠的数值方法;对生产过程中出现的问题进行专门的以数值模拟为中心的CAD,及对先进的工程CAD软件进行深入的研究,以实现与凝固数值模拟的高级联接,才能进一步推动铸造工艺CAD技术的深入发展。

展望未来,铸造工艺CAD将向铸造生产过程的CAD/CAM发展;进一步乃是铸造过程CAE-CIMS;再进一步将是微观组织-使用性能-制造工艺研究相结合的智能专家系统及知识工程数据库研究;更高新一步的发展乃是与铸造有关的科学计算形象化(或称可视化)的研究。70年代后期问世的工作站(特别是工程工作站和人工智能工作站),已成为90年代的热门话题。如机械加工领域工作站中的实体造型和三维图形动态显示等技术,对铸件凝固进程模拟、缺陷分析及实体剖分等方面的研究,都是可借鉴的。正如有人预言,90年代将是工作站的年代。工作站在铸造工艺CAD中也将得到迅速的发展。

参 考 文 献

- 1 张毅.铸件凝固数值模拟及铸造工艺CAD现代进展.铸造,1987,6:8~12
- 2 R.Wlodawer, Directional solidification of steel castings, Pergamen Press, 1966
- 3 R.W.Ruddle, The British Foundryman, 1978, Vol.77, No.9, 197; AFS Transactions, 1979, 87, 423
- 4 [德]英格尔.铸造合金凝固与铸造工艺性,来华讲学讲义.周继扬译.1985
- 5 R.E.Marrone et al, Cast Metals Research Journal, 1972, 8: 94
- 6 洪俊杓,梅田高照等.铸物,1981,56(12):758
- 7 今福一英.日本机械学会论文集(C编).48(1982),436,1968
- 8 《铸造学会动态》,34,中国机械工程学会铸造分会,1992,11,1

- 9 Zhang Yi et al Solidification Process of Large size stainless steel Cast Blades of Hydroelectric Turbines, 50th International Foundry Congress, official paper, No.14
- 10 Zhang Yi, Li Yan Wei et al, Application of Saul'yev' Method to three Dimensional Numerical Simulation of Heavy Casting Solidification, SISC, 88, The Shenyang International Symposium on Casting, 1988, 172~176.
- 11 李延伟, 张毅, 沈阳铸造研究所研究生论文摘要汇编, 1990, 130~134
- 12 李殿中, 张毅, 铝合金凝固过程等轴晶数值模拟, 第一届环太平洋国际先进材料与工艺会议, 1992, 6, 杭州
- 13 金俊泽, 机械工程学报, 1985, 25(1)
- 14 郑贤淑, 钢铁, 1988, 23(10)
- 15 金俊泽, 铸物, 1987, 59(6)
- 16 徐达鸣, 哈尔滨工业大学博士论文, 1989
- 17 Li Qing Chun, et al, "Measurement of Physical Properties of Mold" Int. Symp. on New Develop. of Cast Alloys and Tech, Luoyang, China, 1988, 4 : 14~18
- 18 郑大志, 哈尔滨工业大学硕士研究生论文, 1988, 6, 20
- 19 徐东, 哈尔滨工业大学博士论文,
- 20 喻秋平, 西北工业大学博士论文, 1988, 5, 7
- 21 葛丰德, 第二届全国凝固过程及控制会议论文, 1986, 10, 郑州
- 22 郝守卫, 清华大学博士论文, 1989, 12, 14
- 23 程军, 清华大学博士论文, 1990, 4, 8
- 24 K. H and R. D. Pehlke, AFS Trans, 1984, 92 : 587
- 25 K. Kubo, and, R. D. Pehlke, Metall. Trans, 1985, 6 : 359
- 26 R. A. Stoehr, Model, Cast, and Weld, Processes, Proc. Symp., Aug, 1980, Warrendal, PA, 4.
- 27 S. D. Rider, et al, Model, Cast, And Weld, Processes, Proc. Symp., Aug, 1980, Warrendal, PA, 261
- 28 王深强, 哈尔滨工业大学博士论文, 1991, 2.

第二章 铸件凝固进程数值模拟

众所周知,铸件凝固传热基本规律可通过傅立叶导热微分方程来描述:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{\rho \cdot C_p} \quad (2-1)$$

式中 T ——温度(℃);

t ——时间(s);

x, y, z ——三维空间坐标(m);

ρ ——密度(kg/m³);

C_p ——比热容(J/(kg·℃));

α ——热扩散率(m²/s);

Q ——潜热项(J/(m³·s))。

根据铸件凝固特点,采取适当的处理技巧,再考虑各种单值性条件去数值求解式(2-1)。数值模拟法即将本来求解铸件温度随空间、时间连续分布的问题转化为在时间域和空间域内有限离散点上的温度值的问题,用这些离散点上的温度值去逼近连续的温度分布。理论上,该方法不如数学分析法直接求解导热微分方程直观,但对处理铸件凝固传热问题却体现出较大的灵活性和适应性。实际上,到目前为止,用数学分析法仅能在许多的假设条件下对一维问题和非常简单的二维问题进行解算,对于更复杂的铸件凝固问题则无能为力。

常用数值计算方法有三类:有限差分法(FDM)〔1~4〕、有限元法(FEM)〔5~7〕和边界元法(BEM)〔8~9〕。有限差分法简单、易于计算,特别是显式差分法,它只需要较小的计算机内存和较短的计算时间;有限元法是基于古典变分法而发展起来的计算方法,单元剖分灵活,便于处理复杂的铸件几何外形,但内存需求量较大;边界元法是基于传统的积分方程和有限元概念的一种加权残数法,它可以不考虑内部的未知数而直接求解边界值,然后根据边界值求内部值。

本章将在凝固传热数学模型的基础上,重点介绍各种数值方法的离散模型、常用的解算方法以及各种单值性条件的处理技巧。

第一节 有限差分法

有限差分法的物理基础是能量守恒定律,其数学处理方法就是用差分式代替式(2-1)中的微分项,将微分方程式转化成线性代数方程式或方程组进行数值求解。

图2-1表示差分与微分之间的关系。对于一阶可导的函数 $T(x)$ 在任一 x 点处的一阶和二阶的导数分别为 $\frac{dT}{dx}$ 和 $\frac{d^2T}{dx^2}$;同理其相应的差分公式用 $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ 和 $\frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2}$ 表示。

若在函数的 x 点处分别向前和向后取 Δx 步长,则对于一阶差分式分别有三种不同的基本表达方式,即