数值模拟在铸造中的应用进展

钱怡君，程兆虎，于浩
（合肥工业大学 材料科学与工程学院，合肥 230009）

摘要：综述了铸造过程数值计算的基本理论，简要介绍了国际上优秀的铸造充型和凝固过程数值模拟软件的基本情况和产品特点，对国内相关软件的开发和厂家对模拟软件的选择有一定的启示作用。重点回顾了这些软件在实际铸造和研究中的应用进展，探讨了数值模拟的发展方向。同时指出合理地利用铸造模拟软件，能够优化铸件的微观组织，提高产品质量，降低产品成本，缩短产品设计和试制周期。

关键词：数值模拟；微观组织；产品质量；产品成本；产品设计；试制周期
中图分类号：TP391；TG24　　**文献标识码：**A
文章编号：1674-6457(2012)04-0039-05

The Application of Numerical Simulation in Foundry

QIAN Yi-jun, *CHENG Zhao-hu*, *YU Hao*
(School of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The basic theory of numerical calculations is summarized, and a brief introduction of the basic situations and product characteristics of the outstanding international cast filling and solidification simulation softwares may have some inspiration to the domestic software development and domestic manufacturers' choice of simulation software. Focusing on reviewing the application progress of the software in actual casting and research, the development of numerical simulation is discussed. It also clearly shows that it can optimize the casting microstructure, improve the quality, decrease the cost and reduce the design and trial cycle for the products by using the numerical simulation software properly.

Key words: numerical simulation; microstructure; product quality; product cost; product design; trial period

铸造过程就是将高温的液态金属浇注到封闭的型腔中，通过充型和凝固过程最终获得所需形状铸件的热成形过程。在整个过程中，速度场、应力场和温度场的相互耦合作用非常复杂，难以通过实时观察和测量得出科学的结果，因此利用计算机对铸造充型和凝固过程进行数值模拟显得非常必要。从 20 世纪 60 年代开始凝固过程数值模拟，80 年代初开始充型过程数值模拟和铸件应力应变数值模拟，到 90 年代兴起铸件微观组织数值模拟的研究，数值模拟技术已深入到铸件成形过程的各个方面，铸造过程的模拟仿真研究也正在向微观组织模拟、性能优化及使用寿命预测的方向发展，成为多功能、高保真、高效率的多学科模拟与仿真技术[1-2]。根据美国科学研究院工程技术委员会的测定，计算机模拟仿真可提高产品质量 5～15 倍，提高产品合格率 25%，降低生产成本 13%～30%，降低人力成本 5%～20%，增加投入设备利用率 30%～60%，缩短产品设计和试制周期 30%～60%。由此可见，材料制备工艺的计算机模拟在材料研究领域的发展潜力是巨大的。据悉，美国已经大量采用计算机模拟仿真

收稿日期：2012-06-21
作者简介：钱怡君(1986－)，女，江苏无锡人，在读研究生，主要研究方向为铸造工艺设计及铸造过程 CAE 数值模拟分析。

方法来研究开发汽车、飞机、导弹、航空及航海等装备发动机的结构设计、成形加工及制造[2]。

铸造过程计算机数值模拟，包括凝固过程温度场的数值模拟、充型过程流动场的数值模拟、应力场数值模拟和微观组织形态的数值模拟。通过对这些单一和耦合过程数值模拟的研究，可以对铸件成形过程中产生的诸如缩孔、缩松、气孔、夹渣、浇不足、裂纹等各种铸造质量问题进行分析，找出其产生的内在原因，达到优化铸造工艺，消除铸造缺陷，提高产品质量的作用。可以在生产之前，通过铸造模拟软件对其过程质量进行预测，对不同的工艺方案进行质量对比，实施工艺优化[3-4]。由于产品质量预测在计算机上进行，并没有经过实际生产，因而可以节省大量的人力、物力、财力。尤其是新产品试制和大批量造型线生产的铸件，既方便快捷又有显著的经济效益。通过计算机数值模拟还可以使一直建立在生产经验基础上的旧铸造工艺设计从经验走向科学。

1 数值计算的基本理论

铸造过程计算机数值模拟技术是利用数值分析技术、数据库技术、可视化技术结合经典传热、流动及凝固理论对铸件成形过程进行仿真模拟，以模拟出铸件充型和凝固及冷却中的各种物理场、温度场，并据此对铸件进行质量预测的技术。这项技术可在制造工艺装备及浇注之前，综合评价各种工艺方案与铸件质量的关系，并在计算机屏幕上显示出铸造全过程，预测铸造缺陷，这就使得铸造工艺人员能够根据所存在的问题及时修改方案，从而获得合格铸件。

1.1 充型及凝固过程数值模拟的数学模型

铸造过程的数值模拟涉及到充型过程和凝固过程的模拟，在进行凝固过程计算时假设铸型是瞬时充满的，这时只需计算温度场即可。当铸件壁很薄或充型时间和凝固时间差不多时，必须耦合充型过程流场模拟进行初始温度场计算，然后再进行凝固过程温度场模拟，而充型过程的流场控制是数值模拟最核心的问题之一，相对于凝固过程只涉及温度场来说，充型过程的模拟显得比较复杂和困难。这是由于充型不仅涉及到温度场还包含速度场、能力场的计算和模拟，属于计算流体学(CFD)范畴。其基本思想可以归结为：把原来在时间域和空间域上连续物理量的场，用一系列有限个离散点上变量值的结合来替代，通过一定的原则和方式建立起关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组，然后通过求解代数方程组获得场变量的近似值[5-7]。

数值计算中常用的离散方法主要包括：有限差分法(FDM)、有限元法(FEM)、边界元法(BEM)、有限体积法(FVM)和控制体积有限差分法(CV-FDM)，一般来说针对不同的研究对象采用不同的数值模拟方法。

在铸造过程数值模拟中，高温金属液的流动可以看成是粘性不可压缩牛顿流体的非稳态流动，一般采用 k-ε 双方程紊流模型和 VOF 方法来处理自由表面，通过求解流体在一段时间内运动的质量守恒、动量守恒和能量守恒方程(1)，(2)，(3)，并追踪流体表面的变化体积函数(4)，得到液态金属充型的流动性，从而达到优化模具设计，预测铸造缺陷等目的[7-11]。

连续性方程：

$$\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z = 0 \tag{1}$$

Navier-Stokes 方程(简称 N-S 方程)：

$$\rho(\partial u/\partial t + u\partial u/\partial x + v\partial u/\partial y + w\partial u/\partial z) = -\partial p/\partial x + \rho g_x + \mu\nabla^2 u$$

$$\rho(\partial v/\partial t + u\partial v/\partial x + v\partial v/\partial y + w\partial v/\partial z) = -\partial p/\partial y + \rho g_y + \mu\nabla^2 v \tag{2}$$

$$\rho(\partial w/\partial t + u\partial w/\partial x + v\partial w/\partial y + w\partial w/\partial z) = -\partial p/\partial z + \rho g_z + \mu\nabla^2 w$$

能量方程：

$$\partial(\rho c_p T)/\partial t + \partial(\rho c_p u T)/\partial x + \partial(\rho c_p v T)/\partial y + \partial(\rho c_p w T)/\partial z = \partial(k\partial T/\partial x)/\partial x + \partial(k\partial T/\partial y)/\partial y + \partial(k\partial T/\partial z)/\partial z + S \tag{3}$$

体积函数：

$$\partial F/\partial t + \partial(Fu)/\partial x + \partial(Fv)/\partial y + \partial(Fw)/\partial z = 0 \tag{4}$$

式中：u，v，w 分别为沿 x，y，z 方向上的速度分量；ρ 为金属液密度；t 为时间；p 为单位密度的压力；μ 为金属液运动黏度；g_x，g_y，g_z 分别为沿 x，y，z 方向上的重力加速度；∇^2 为拉普拉斯算子；c_p 为金属液定压比热容；T 为温度；F 为体积函数，$0 \leqslant F \leqslant 1$。

求解上述方程，首先要进行离散化处理，离散后采用 SOLA 法求解压力场和速度场，即求解动量方程和连续方程，用 VOF 法进行自由表面处理。

2　铸造充型及凝固过程模拟软件的应用进展

通过计算机对铸造过程模拟,可以对铸件充型和凝固过程中的任一时刻、任一位置进行局部或整体性的透视观察,为铸造工艺人员制定合理的铸造工艺方案提供较为可靠的依据,从而省掉了传统的“编工艺－制模造型－试浇试铸－解剖铸件－修改工艺”的过程,大大缩短工艺试验周期,确保铸件质量,提高工艺出品率,降低生产成本和废品损失,提高企业的经济效益,对企业有极高的实用价值。

2.1　铸造充型凝固过程模拟软件的发展

近几十年来,随着铸件充型凝固过程数值模拟技术的不断完善,相应用于分析铸件形成过程的商品化软件不断出现。这方面的第一个软件是在 1989 年,由德国 Aachen 大学 Sahm P. R. 教授主持开发的 MAGMA Soft。之后很多商业化的软件不断涌现出来,目前许多发达国家都有自己的商业化模拟软件,如美国的 AFS Solidification System、Flow3D 和 ProCAST 等,法国的 SIMULOR,芬兰的 CASTCAE,瑞典的 NOVAFLOW&SOLID,英国 SOLSTAR,日本的 ADSTEFAN,韩国的 Any Casting 等。这些软件已经与实际生产结合起来,并在发达国家铸造企业中获得了较广泛的应用,取得了很好的经济效益,部分软件也已进入中国大型企业和科研院所。目前世界上主要商品化软件的名称、国别、所采用的算法和分析内容、主要特点及适用范围见表 1[12]。

以上所介绍的目前国外优秀的铸件充型和凝固过程软件代表了当今世界铸造业计算机数值模拟的最高水平。可以看出,虽然这些软件它们各有特点,各有侧重,但基本都可以完成各种铸造合金包括砂型铸造在内的多种铸造方法下的充型过程分析、凝固过程分析、残余应力和变形分析以及铸件缺陷和性能预测等主要的分析内容。另外一些软件同时还可以进行铸件的微观组织及微观结构分析,这些也正是铸造工程这一研究领域将来发展的方向[14]。

2.2　铸造充型凝固过程模拟软件的应用

表 1 中所述软件已在欧美等发达国家的铸造行业中获得了较广泛的应用,并取得了显著的经济效益,其中部分模拟软件已进入中国大型铸造企业和重要的科研院所,如 MAGMA Soft,ProCAST,NOVACAST 等。同时国内的一些重点院校、研究所也开始进行了相关软件的开发,并取得了卓越成果,如由华中科技大学自主研究开发的用于进行铸造模拟的软件华铸 CAE/InteCAST,已成功运用于实际生产,给企业带来显著的经济效益。另外,清华大学研发出的 FT-STAR 也用于实际生产,以及中国科学院金属研究所的 IMR-3D 等。目前,已有众多的企业纷纷采用数值模拟技术,应用于实际生产[17]。

美国所有的汽车生产厂家及约 30%的铸造企业都在使用铸造充型凝固模拟软件,美国铸造厂家生产的铸件一半以上都采用了凝固模拟程序。日本的东北大学和大阪大学在这方面的研究具有世界先进水平,但日本铸造企业在软件的使用上落后于美国。日本全国 1 500 家铸造企业中,只有 150 家应用凝固模拟软件优化铸件浇注系统。铸造充型及凝固模拟在英国、德国、法国、芬兰、瑞典和其他一些欧洲国家也得到了高度发展。德国的 MAGMA Soft 软件已在世界上许多铸造企业中应用,法国 Pechiney 公司的 SIMULOR 因使用方便,也已在欧美国家的铸造厂家广泛采用[18]。

3　铸造模拟的发展前景

如今国内外的铸造模拟都已从实验室研究进入到工厂实际应用阶段,可以做到以铸造理论为指导,以计算机数值模拟为辅助手段,优化控制充型及凝固过程,并预测铸件缩孔、缩松、应力变形及裂纹等缺陷。铸造是产品生产的基础环节,铸件设计、质量、成本和试制周期对整个产品的开发生产都有很大影响。

以铸件成形过程数值模拟为核心的铸造模拟研究成果日益实用化,且研究内容也已扩展到了铸造过程的各个方面,下面介绍今后数值模拟发展方向[18]。

1) 氧化夹杂物模拟;

2) 复杂多相流模拟;

3) 造型/制芯过程模拟;

4) 气化模铸造/气化模模样生成过程模拟;

表 1 国外主要的模拟软件[12-16]

Table 1 The main foreign simulation softwares

软件名称	国别	算法	分析内容	主要特点	应用范围
Flow3D	美国	FVM/FDM	流动与传热、微观组织	可自动划分网格并提供多组块网格划分系统，可进行凝固收缩、二元偏析、表面缺陷追踪、显微组织等分析。具有 CAD 建模系统、多种物理场模型、高级数字化技术、强大的前置处理和后置处理等功能。	砂型铸造、压力铸造、金属型铸造、消失模铸造、半固态铸造、倾斜浇注和离心铸造等
MAGMA Soft	德国	FDM/FEM	流动与传热、应力变形、微观组织	软件具有 CAD 建模、充型分析、凝固分析、显微组织分析、残余应力分析、铸件变形分析等，具有较强的前置处理和后置处理功能，能快速模拟复杂铸件的充型及凝固过程，预测缩孔、缩松等缺陷。	各种铸造合金，特别是特种合金的砂型铸造、壳型铸造、熔模铸造、压力铸造、金属型铸造、低(高)压铸造等
ProCAST	美国	FEM	流动与传热、应力变形、微观组织、对流辐射	软件提供了自动网格划分、完善的数据库和复杂的可视化工具。可模拟铸造充型和凝固过程的自由表面流动、温度场、流场、应力场、变形分析以及微观组织结构的形成，如孔隙、气孔聚集。	各种铸造合金的连续铸造、消失模铸造、砂型铸造、壳型铸造、熔模铸造、压力铸造、金属型铸造、离心铸造等
CASTCAE	芬兰	CVM/FDM	流动与传热、微观组织	软件具有高级的铁质模型、发热模型、X 射线可视化技术和经过工业生产验证的充型算法等。具有 CAD 建模、充型分析、凝固分析、显微组织分析等功能，模拟结果可以直接在媒体播放机上播放。	砂型铸造、壳型铸造、熔模铸造、压力铸造、金属型铸造和半固态铸造等
SIMULOR	法国	FVM	流动与传热	具有强大的 CAD 建模功能，可模拟铸造充型和凝固过程中的温度场、流场、速度场	砂型铸造、精密铸造、金属型铸造、低压铸造
NOVAFLOW & SOLID	瑞典	FDM/模数法	流动与传热	可进行铸造过程中的热传导、双向流、凝固模拟，并分析温度场、流场、凝固收缩、凝固时间、热模数等对铸造成形过程的影响，最终能形成二维和三维的可视图结果	砂型铸造、壳型铸造、压力铸造、金属型铸造、熔模铸造等
SOLSTAR	英国	FVM/模数法	传热分析	软件可预测金属液流动温度、流体压力、流速，也能预测凝固时间、宏观和微观收缩、温度分布、冷却速率、温度梯度等	多种铸造工艺
AFS Solidification System	美国	FDM	流动与传热	软件采用有限差分法，并综合了温度场和铸件体积的计算，提高了铸件缩孔缩松和热节预测的准确性并优化铸造工艺设计。主要包括了 CAD 建模、充型分析、凝固分析、后处理过程中浇注过程的动态显示和截面 X 射线显示等功能。	各种铸造合金的砂型铸造、壳型铸造、熔模铸造和金属型铸造。
SOLIDA	日本	FDM	流动与传热	软件采用有限差分法，可以模拟铸造充型及传热等过程，并继承了 Niyama 缩松判据	多种铸造工艺
ADSTEFAN	日本	FEM	流动与传热	可处理大型网格模型，预测铸件收缩、稳态模温、凝固缺陷的大小和位置，并计算铸件和模具的应力变形和结构变形	压力铸造、砂型铸造等多种铸造工艺
Any Casting	韩国	FEM	流动与传热、应力	具有强大的前处理、充型凝固过程模拟、后处理功能及完善的热物性数据库。能快速模拟复杂铸件的缩孔缩松等缺陷的形成过程。	多数铸造工艺

5）半固态铸造模拟；

6）微观数值模拟。

这些模拟技术还处于理论研究阶段，离实际应用还有很长的路要走，相信随着计算机技术的发展并经过广大铸造工作者的不懈努力，数值模拟技术一定会得到进一步的完善和发展，为铸造行业的发展提供一条以科学的定量决策手段进行工艺设计的道路。

参考文献：

[1] 李殿中，康秀红，夏立军，等. 可视化铸造技术的研究与应用[J]. 铸造，2005，54(2)：148－152.

[2] ZHANG H，WANG X Y，ZHENG L L，et al. Numerical Simulation of Nucleation，Solidification and Microstructure Formation in Thermal Spraying[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，2004(47)：2191－2203.

[3] 赵华洋，陈勇，张建国，等. 铸造过程的 CAE 数值模拟技术[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版)，2005，20(4)：397－399.

[4] ZHOU J X，CHEN L L，LIAO D M，et al. Numerical Simulation of Low Pressure Die Casting's Solidification Process and Porosity Prediction[J]. Proceedings of Asia-Pacific Conference of Materials Processing，2008(6)：816－821.

[5] 柳百成. 铸件充型凝固过程数值模拟国内外研究进展[J]. 铸造，1999，48(8)：40－45.

[6] 张红松，张希俊，张方. 铸造过程计算机数值模拟的国内外研究概况[J]. 昆明理工大学学报：理工版，2002(2)：55－58.

[7] 林国荣. 铸件形成过程计算机数值模拟的发展及应用[J]. 现代铸铁，2001(2)：8－9.

[8] 周建新，陈立亮，廖敦明，等. 铸造 CAE 技术及其在消失模与 V 法铸造中的应用[J]. 铸造设备与工艺，2009(6)：12－14.

[9] 胡红军，杨明波，龚喜兵，等. 铸造工艺的数值模拟优化[J]. 兵器材料科学与工程，2006，29(6)：51－53.

[10] 杨宠，林汉同. 铸件凝固过程应力数值模拟技术[J]. CAD/CAM 与制造业信息化，2004(11)：25－27.

[11] MI Guo-fa，LIU Xiang-yu，WANG Kuang-fei，et al. Numerical Simulation of Low Pressure Die-casting Aluminum Wheel [J]. CHINA FOUNDRY. 2009，6(1)：48－52.

[12] 孙逊，安阁英，苏仕方，等. 铸件充型凝固过程数值模拟发展现状[J]. 铸造，2000，49(2)：84－88.

[13] 米国发，刘翔宇，王狂飞. 铸造充型过程数值模拟的研究进展及应用[J]. 河南理工大学学报，2007，26(3)：334－339.

[14] 曹洪吉，宋延沛，王文炎. 铸造过程计算机模拟研究应用现状与发展[J]. 河南科技大学学报，2006，27(1)：5－8.

[15] 周丹晨，蒋玉明，杨屹. 国外铸件充型凝固过程数值模拟软件介绍[J]. 热加工工艺，2000(5)：45－62.

[16] 吴翠姑，李日，夏兴川，等. 铸造 CAE 软件数据库研究综述[J]. 铸造，2008，57(2)：110－113.

[17] ZHOU Jian-xin，LIU Rui-xiang，CHEN Li-liang. High Pressure Die-casting Module of InteCAST Software and Its Applications[J]. Journal of Materials Processing Technology，2007(192/193)：249－254.

[18] 赵恒涛，米国发，王狂飞. 铸造充型及凝固过程模拟研究概况[J]. 航天制造技术，2007(1)：28－33.

国内首套激光三维焊接设备将用于汽车零件焊接

2012 年 6 月 17 日，由华工科技与德国某激光装备企业共同开发完成的国内首套激光三维远程焊接系统设备面世。

该设备将光线反射的原理巧妙地用在激光焊接系统，使焊接速度提高 1 倍。通过电脑控制反射角度，指哪儿焊哪儿，零件不用换位就能全方位三维焊接。

据了解，复杂零件长 20 mm 的焊缝，采取三维焊接系统仅需要 1 s 左右。同时，这一与国外相接轨的技术，价格却只有国外同类产品的一半。这一新设备得到汽车制造商的青睐，将应用到高端车型的零件焊接。

（来源：中华机械网）