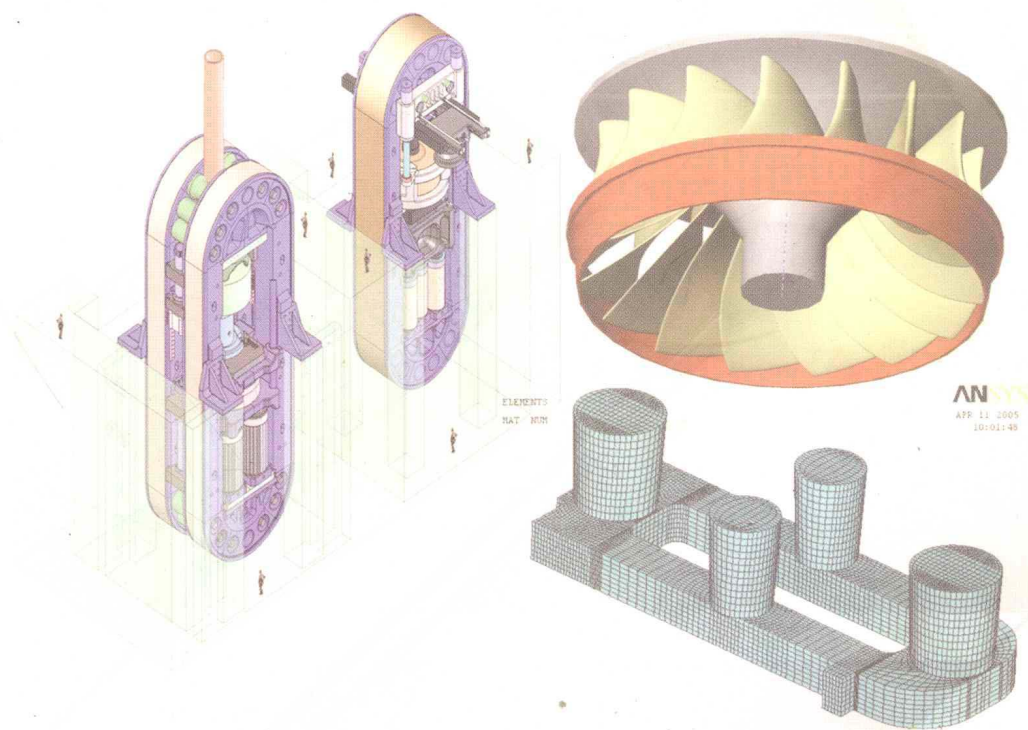


重大装备制造研讨会 论文集

(2006年12月15日 北京)



清华大学机械工程系

先进成形制造教育部重点实验室

“重大装备制造”研讨会 论文集

清华大学机械工程系
先进成形制造教育部重点实验室
2006 年 12 月 15 日 北京

“重大装备制造”研讨会 学术指导委员会

陆燕荪 潘际銮 柳百成 汪建业 颜永年 雷源忠
王国彪 曾攀 钟约先 陈强 黄天佑

“重大装备制造”研讨会论文集 编委会

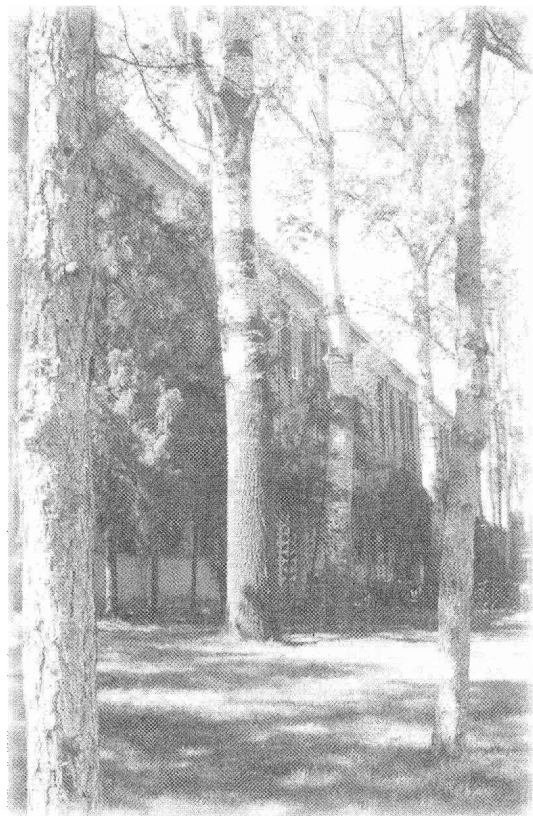
单际国 刘源 赵海燕 孙振国 林峰 方刚
康进武 黄小斌

先进成形制造教育部重点实验室

清华大学“先进成形制造”教育部重点实验室是在“211 工程”、“985 工程”持续支持的基础上，根据国家中长期科技发展规划关于制造业的发展战略，面向国民经济和国家重大工程之需求，依托机械工程系进行建设的科研平台。重点实验室实行主任负责制，主任由机械工程系系主任担任。

“在中国制造业的关键基础技术中有所突破和创新、为国家重要建设项目作出应有贡献”是本重点实验室的发展目标。实验室定位为应用基础研究：以国家高科技、关系国计民生的装备制造业的需求及学科前沿发展为引导，创立高水平的技术创新和人才培养基地，为满足高科技、国家重大装备制造的发展对先进成形制造技术的迫切需求，提供方向性、共性、关键性的理论依据和原理性技术支撑，解决成形制造发展中的关键科学和技术问题。

重点实验室的研究队伍中有中国科学院院士、中国工程院院士、“长江学者奖励计划”特聘教授、国家杰出青年基金获得者、“新世纪百千万人才工程”国家级人选、教育部“高校青年教师奖”获得者、“新世纪优秀人才支持计划”入选者各 1 名，45 岁以下中青年教授 15 名。本实验室所依托的“材料加工工程”在 2001 年全国重点学科评选中以满分位居本学科全国第一名。2000 以来，本实验室成员承担和完成了国家重大科研任务（“973”、“863”、攀登计划、国家自然科学基金、国家攻关计划）90 多项、省部级科研任务近 50 项；在所完成的科研成果中，获得国家自然科学二等奖 1 项、国家科技进步二等奖 1 项、省部级科技进步一、二等奖 8 项，获授权专利 60 多项，其中发明专利 43 项；在所发表的 2000 余篇学术论文中，有 500 多篇被 SCI 检索，1 篇发表在“Science”上（2001 年）；入选全国百篇优秀博士论文 2 篇（2004 年、2005 年）。重点实验室现有面积 5000 多平方米，仪器设备 1821 台（件），其中大型仪器设备 20 多台（件），固定设备资产总值（原值）3800 多万元。



重点实验室下设五个分室：

- 数字化成形制造分室（分室主任：曾攀教授）
- 轻金属成形制造分室（分室主任：李言祥教授）
- 快速成形制造分室（分室主任：林峰副教授）
- 机器人成形制造分室（分室主任：都东教授）
- 重大装备成形制造分室（分室主任：马庆贤教授）

学术委员会名誉主任	陆燕荪 研究员
学术委员会主任	关桥 中国工程院院士
学术委员会副主任	潘际奎 中国科学院院士
学术委员会副主任	柳百成 中国工程院院士
实验室主任	曾攀 博士 教授
实验室副主任	单际国 博士 教授
实验室秘书	刘源 博士

联系方式：北京市清华大学机械工程系，100084
电 话：010-62782956；传 真：010-62770190
网 址：<http://me.tsinghua.edu.cn/lab/index.htm> .
邮 箱：ixxkvk@tsinghua.edu.cn

序 言

重大装备是指结构巨大、系统复杂、工作在极端条件与环境下的装备,包括成套的可以进行巨量力能转换的重型制造设备或进行机械加工的制造系统,也包括组成成套装备的大型零部件;对于重型制造设备而言,最有代表性的就是数万吨级液压机,它是金属成形、石化和能源电力等行业的大型、超限的顶级装备,对于后者而言,典型代表就是大型铸锻件,它是核电、水电、火电、石化等领域大型设备的重要部件。

据初步估算,要进行大型飞机机身隔框和起落架的整体模锻,将需要 8 万吨级的液压机;长江三峡水轮机转轮的特大型铸焊件重达 430 吨,1000MW 超超临界汽轮机发电机组中的成套大型铸锻件、1000 吨级加氢反应器中的大型铸锻件等,这些都是对国家经济建设和国防建设有重要影响的重大装备和关键部件。我国在刚制定的国家中长期科学和技术发展纲要中明确提出了要大力发展装备制造业,涉及极端制造、智能制造、高可靠性成套装备,由于重大装备将关系到我国经济命脉、国家核心竞争力和国家安全,对我国综合竞争力、国家经济、社会发展和国防都具有战略性、全局性和长远性的意义,因此,只有自主创新才是重大装备发展的唯一出路。

我系早在上世纪五十年代就开始从事重大装备的研究,参与设计制造了国内第一台万吨水压机;在上世纪六十年代,参加完成了我国第一台核反应堆池壳的制造任务;在基础研究方面,在 1992 年,提出的“大型铸锻件的模拟技术及质量控制研究”项目获得国家自然科学基金委重点项目的资助,1998 年,所取得的成果“大型钢丝缠绕预应力系列压机”获国家科技进步三等奖。

近年来,我系一直坚持开展与重大装备相关的研究工作,与一重、二重、宝钢、马钢、沈重、内蒙二机等企业开展了大型装备制造的应用研究;与二重合作,进行了三峡水轮机叶片的研究;与马钢合作,进行了特大型轧钢机架铸钢件的研究;与一重合作,开展了 300MW 汽轮机低压转子的研究;目前,以我系的核心技术,正以总包设计的方式研制一系列的大型锻造液压机,如 3.5 万吨航空发动机涡轮盘模锻液压机、我国最大的 3.6 万吨超重型厚壁钢管挤压液压机、以及更大吨位的超大型液压机等。我系与中冶赛迪工程技术股份有限公司联合成立了“冶金装备研究所”,正在进行高炉无料钟炉顶布料器、300t 新型转炉、大型环形炉、连铸结晶器及保护渣自动加入装置等的设计和数字化研究;我系还将开展与核能装备、军工装备相关的设计和研究工作。目前,我系申报的针对三峡工程水轮机装备的“大型铸锻件制造关键技术与装备研制:大型铸锻件共性技术研究”项目已得到十一五国家科技支撑计划的支持。

重大装备的制造涉及材料、冶金、成形制造和加工制造、检测、自动控制等领域,我系将研究重大装备制造的共性基础问题,包括重型装备的新型承载结构形式、系统的高可靠性、本体结构的可制造性、大型铸锻件的加工工艺与质量控制、表面改性与强化、故障诊断、修复装备与技术等;这必须采用先进的数字化技术、物理模拟技术、大比例实体模型方法以及先进成形工艺技术(铸、锻、焊)进行研究,我系在这些方面已具备了较好的基础。

我系近年来在“重大装备制造”这一领域从事研究的科研人员,有教授副教授近 20 人,具有博士学位的年轻学者 15 人,在这一领域从事研究的博士和硕士研究生有 20 余人。

“重大装备制造”也是我校事业发展“十一五”规划纲要中重要的支持领域,正在建设的先进成形制造教育部重点实验室也将其列为重要的发展方向之一,希望在开展国际学术前沿领域研究的同时,结合我们已有的工作基础,开展有特色的基础和应用研究,特别强调学术研究的前沿性、学科方向的交叉性、研究成果的实用性,力使我系在这方面的研究独树一帜,形成具有鲜明特色的新方向。为此,先进成形制造教育部重点实验室和机械工程系联合发起

和举办“重大装备制造”研讨会，希望通过研讨会“连点成面”、整合相关的研究成果，形成研究群体，并凝练我系新的学科方向，推动学科发展。该研讨会将以机械工程系相关研究方向的人员为主，介绍各自在该领域所作的研究工作以及最新进展情况。这次“重大装备制造”研讨会的会议主题为：

▶ 重大装备关键零部件设计与制造

▶ 预应力重型装备设计与制造

▶ 重大装备成形制造自动化技术

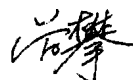
研讨会邀请国务院三峡办、国家自然科学基金委员会、中国机械工业联合会、中国重机协会等相关部门的领导和专家与会进行指导。希望通过这次学术研讨会，在学术指导委员会的指导下，达到以下几个目标：(1) 充分展示我系在重大装备制造方面的研究成果；(2) 在已有基础上，加强学科交叉的集成，突出重点，以取得更多的标志性、创新性成果；(3) 加速整合队伍和培养杰出人才，通力合作，形成在重大装备制造方面具有创新精神的研究群体。

本文集是这次研讨会所收集论文的汇集，由于时间仓促，在文集整理方面肯定存在不少问题和错误，敬请各位专家谅解和指正。

机械工程系系主任

先进成形制造教育部重点实验室主任

长江学者



2006年12月15日

目 录

主题 1: 重大装备关键零部件设计与制造

大型铸件凝固过程数值模拟进展	1
柳百成 沈厚发 韩志强	
我国大型铸钢件生产的现状与关键技术	9
黄天佑 刘小刚 康进武 沈厚发 柳百成	
重大焊接结构件应力与变形的预测与控制	19
吴爱萍 赵海燕 史清宇 蔡志鹏 鹿安理	
球墨铸铁核乏燃料储运容器	32
李言祥 陈 祥	
大型锻件制造技术的研究	39
马庆贤 钟约先 石 伟 袁朝龙	
水轮机铸钢件的热裂和变形预测	45
康进武 刘小刚 张 然 段宇波 黄天佑 柳百成	
大型锻件内裂纹控制和锻造质量控制	52
袁朝龙 钟约先 马庆贤	
高硅铸钢——一种新型的坦克履带板材料	59
陈 祥 李言祥	
大型结构焊接过程数值模拟的研究	66
蔡志鹏 赵海燕 史清宇 吴爱萍 鹿安理	

主题 2: 预应力重型装备设计与制造

预应力坎合原理初探及应用	79
颜永年 彭俊斌 林峰 吴任东 张人佶	
预应力钢丝缠绕技术在重型结构中的应用	90
林 峰 颜永年 吴任东 张人佶 卢清萍	
第三代北京谱仪核心部件机械结构的数字化设计和分析	99
曾 攀 雷丽萍 赵瑞海 李 莹	
大型冶金装备的数字化设计	106
曾 攀 方 刚 沈厚发 雷丽萍 张文增	
40MN 离合器式螺旋压力机本体结构的有限元分析及优化	118
方 刚	

30MN 大型镁合金压铸机整机结构的数字化分析	126
张骁峰 曾 攀 雷丽萍	

主题 3: 重大装备成形制造自动化技术

大型水电站水轮机叶片坑内检修机器人研究进展	132
陈 强 都 东 孙振国 张文增	
机车车轴径向超声自动探伤系统	145
孙振国 支正轩 杜学刚	
重大装备可靠性分析新理论与新方法研究	153
张 伟	
高档数控系统的研究现状和发展方向	160
叶佩青 张 辉 赵 彤 杨开明	
液压挖掘机斗杆断裂原因分析及设计改进	172
常保华 都 东 黄 华	
大型工件现场自动化焊接装备—爬行式全位置弧焊机器人	177
郑 军 马兆瑞 刘正文 潘际奎	

大型铸件凝固过程数值模拟进展

柳百成 沈厚发 韩志强

(清华大学机械工程系, 先进材料成形制造教育部重点实验室, 北京, 100084)

(联系人: 沈厚发, 博士, 副教授, 电话: 010-62789922; 电子邮箱: shen@tsinghua.edu.cn)

摘要: 本文介绍大型铸件充型与凝固过程宏观偏析的数值模拟进展。充型过程数值模拟已有很多成功的应用。为了满足大型铸件计算规模的要求, 大涡模拟可能会发挥越来越重要的作用。格子气模型是一种很有发展前途的计算方法。宏观偏析是大型铸件很难避免的重要缺陷。目前采用数值计算方法对实际铸件进行宏观偏析预测的研究工作还很少。计算大型铸件宏观偏析的数学模型应综合考虑凝固收缩及等轴晶沉降等复杂冶金现象。

关键词: 大型铸件; 充型; 凝固; 宏观偏析; 数值模拟

Progress in Numerical Simulation on Solidification of Large Steel Casting

LIU Baicheng SHEN Houfa HAN Zhiqiang

(Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education.

Dept. of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing, P.R.China, 100084)

Correspondent: Dr. Shen Houfa, associate professor; Tel: 010-62789922; Email: shen@tsinghua.edu.cn

Abstract: The progress in numerical simulation on mold filling and macro-segregation during solidification of large steel casting is introduced in this paper. Many successful applications have been realized for the numerical simulation on mold filling. In order to satisfy the requirements of calculation capacity for the large steel casting, large eddy simulation method may play an important role and Lattice Boltzmann method may be a potential computational technique. Macro-segregation is an important defect which is difficult to prevent in large steel casting. The research of numerical prediction on macro-segregation in real casting is still limited. Complex metallurgical phenomena such as solidification shrinkage and deposition of equiaxed should be taken into account in the mathematical model for the calculation of macro-segregation in large steel casting.

Keywords: Large steel casting; Mold filling; Solidification; Macro-segregation; Numerical Simulation

1. 引言

大型铸钢件的生产对铸造技术有很高的要求, 其生产能力和技术水平已经成为一个国家制造业水平的重要标志。经过几十年的发展, 尤其是近年来的努力, 我国在大型铸钢件制造已具备了一定

的基础,现在已经能够自行生产制造某些特大型铸钢件。例如,中国第二重型机械集团公司成功铸造了重量在 400 吨以上的大型轧钢机机架。但是,在大型铸钢件的铸造生产过程中凝固条件和生产工艺复杂,影响因素众多,容易产生各种缺陷,常见缺陷有:缩孔、缩松、偏析、裂纹等。

数值模拟是大型铸件铸造工艺的重要辅助技术。采用数值模拟方法可以预测铸件质量,优化工艺措施^[1-4]。本文主要介绍大型铸件充型与凝固过程宏观偏析的数值模拟进展。

2. 铸件充型及凝固数值模拟

铸件充型过程的数值模拟技术始于 20 世纪 80 年代初。与凝固传热过程计算机模拟相比,充型过程计算机模拟的起步较晚。充型过程自由表面的位置不断变化,流动伴有传热现象并相互影响,型腔内气体压力、金属液与铸型间的热阻、型壁状况、入流条件、结晶潜热及固相率等都影响充型过程。因此,充型过程的计算机模拟是一个相当复杂的数值模拟问题。

80 年代末期,清华大学开发了凝固模拟仿真软件 FT-STAR,采用 SOLA-VOF 法对充型过程进行了模拟,并研究了充型过程对浇注完成后铸型内初始温度场的影响。目前,国内哈尔滨工业大学、华中科技大学、沈阳铸造研究所等单位在从事铸件充型过程数值模拟方面的研究工作。国际上成熟的商品化软件包括:德国的 MAGMA、美国的 Procast、芬兰的 CastCAE、西班牙的 ForCAST、英国的 Solstar、日本的 CASTTEM、法国的 SIMULOR、瑞典的 Novasolid 等。

铸件充型过程中液态金属的流动属于紊流流动。早期,充型过程流场的数值模拟大多采用层流模型。随着计算流体力学的发展,各种紊流模型逐渐成熟。紊流通常可采用直接模拟、大涡模拟(LES)及 Reynolds 时均方程进行计算。目前应用最多的紊流模型是标准 $K-\epsilon$ 模型和零方程紊流模型。在标准 $K-\epsilon$ 模型中采用两个紊流特征量(紊流动能 K 和紊流动能的耗散率 ϵ)来表示动量守恒方程中的紊流粘度 μ_t 。由于雷诺应力主要由大尺度脉动贡献,而大尺度脉动与流动的几何特性密切相关。因此,雷诺平均模式不是普适的,而是和流动有关。就是说,不存在对一切流动都适用的统一模式;对于不同类型的流动,模式的形式或系数需要修正,而这种修正常常带有经验性。所以,雷诺平均模式不是理想的封闭方法。大涡模拟的思路是:直接数值模拟大尺度紊流运动,而利用次网格尺度模型模拟小尺度紊流运动对大尺度紊流运动的影响。大涡模拟方法对复杂流动现象具有极强的模拟能力,应用 LES 方法可以获得较双方程及多方程紊流模型更为精细的数值模拟成果,同时大涡模拟也是联系雷诺时均紊流模型与直接数值模拟的桥梁,该方法必将为描述铸件充型过程中液态金属流动发挥越来越重要的作用^[5]。

描述铸件充型过程中液态金属不可压缩非稳态流动的基本数学模型为连续性方程和动量守恒方程。在耦合温度场的情况下,还应考虑能量守恒。至目前,求解动量守恒方程主要有如下四种算法,即:(1) SIMPLE 及 SIMPLE 改进方法;(2) MAC 及 SMAC 法;(3) SOLA 法;(4) 格子气法。在用 SOLA 方法解动量方程和连续性方程时,先将当前的压力与速度代入动量守恒方程,求出一个试算速度场,并将试算速度场代入连续性方程中;如果没有满足连续性方程,则直接通过调整压力而获得新的试算速度,再代入连续性方程;当试算速度满足连续性方程时,这时得到的速度场和压力场就是新时刻的速度场和压力场。SOLA 方法只用一个迭代过程就同时得到了速度场和压力场,

因而具有较快的运算速度。格子法(Lattice Boltzmann)作为一种新近发展起来的可模拟粘性不可压流体运动的计算技术,与传统的流体力学数值方法不同,毋须建立宏观的连续介质模型,而直接从分子运动论和统计力学的观点和理论出发,以有限速度集建立微观粒子离散速度及时空的运动模型,从而再现流体的宏观特性。它也不同于真实的微观模型,而是介于宏观和微观之间的中观模型。所依据的物理事实是:流体由大量的微观粒子组成,流体的宏观力学性质由微观粒子的运动所决定,但与真实的微观运动细节无关,只需遵守流体的质量、动量和能量守恒等基本物理规律。格子气模型比传统的解动量守恒方程的方法快 1000 倍以上,因此,格子气模型是一种很有发展前途的计算方法^[6]。

铸件充型过程中液态金属是带有自由表面的流动。对于铸件充型过程中自由表面的处理目前主要有两大类:跟踪法(Tracking method)和归零法(Capturing method)。跟踪法即拉格朗日法,利用界面上离散点的位置变化来表示金属液的流动状况。归零法不显示跟踪界面的移动,而是采用一个函数来表示每一个计算网格的状态从而达到捕获自由表面的目的。早期的 VOF 方法采用直线或平面来近似表示金属液自由表面。后来人们提出了改进的 VOF 法,该方法利用周围网格的体积函数值(F)计算出当前网格的 F 值以及自由表面法向量。即使在网格较为粗糙的情况下,模拟的自由表面的形貌也有较好的效果。

通过流场、温度场及自由表面函数耦合计算后可得出充型表面的位置、流场特征及温度场分布。进一步根据缩孔、疏松判据可以确定凝固后铸件缩孔、疏松位置,从而通过改变、优化铸造工艺,控制铸件质量。

图 1 至图 4 表示清华大学为马鞍山钢铁公司进行的双板轧机大型轧钢机架铸造工艺分析^[4]。马钢双板轧机机架总件数为 18 片,铸造生产时间为 8 个月。图示所示铸件重 140t,4 个冒口重 82t(其中单个大冒口重 25t,小冒口重 16t),铸件轮廓尺寸 10200mm×4300mm×810mm。地坑深 1500mm。图 1 表示充型至冒口根部(离铸件底部 810mm)时间为 144s。充型过程中,钢水液面在铸件本体中的上升速度约为 6.6mm/s。充型结束时,铸件最大温差约为 25℃。由于工厂实际熔化能力不足,两包钢水第一次浇注时不能充满冒口。模拟结果显示,50min 内型腔中钢水温降很小,浇注系统畅通,铸件几乎没有凝固(最厚约几 mm)。如能及时补浇钢水,不会影响冒口补缩。由于铸件大,相应的凝固收缩也很大,因此在其凝固过程中还需要点补冒口。模拟表明两次点补冒口可有效防止疏松,并且点补时间间隔不宜超过 4h。图 2 为第一次点补冒口前(总时间 5h20min)的温度场,冒口液面下降了约 320mm。根据收缩体积,第一次点补大约需要 8t 钢水。图 3 为第一次点补后 10min(总时间 5h30min)的温度场,点补后,冒口全部充满。图 4 为第二次点补前(总时间 9h50min)凝固壳示意图(不包括两相区)。为了透视凝固补缩通道,模拟分析软件后处理对铸件进行了局部剖切。图中可见,第二次点补时,小冒口根部已经完全凝固,而大冒口仍将按顺序凝固对铸件保持畅通的补缩作用。

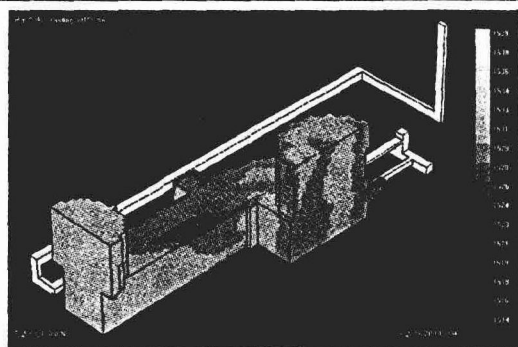


图 1 第一次浇注结束后钢水温度分布图（冒口未充满）

Fig.1 Temperature distribution after the first filling (riser is partially filled)

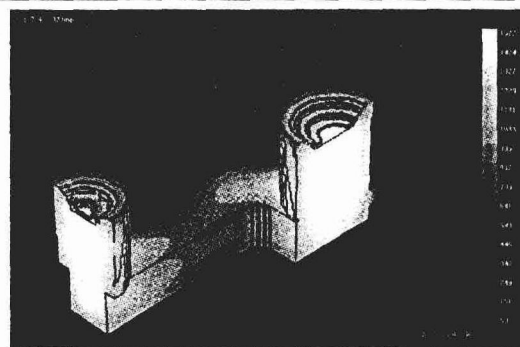


图 2 第一次点补冒口前的温度场

Fig.2 Temperature distribution before the first feeding

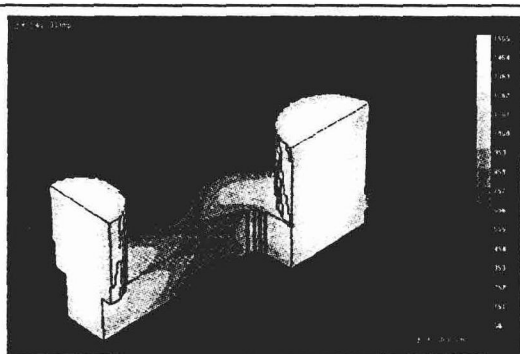


图 3 第一次点补后 10 分钟的温度场

Fig.3 Temperature distribution at ten minutes after the first feeding

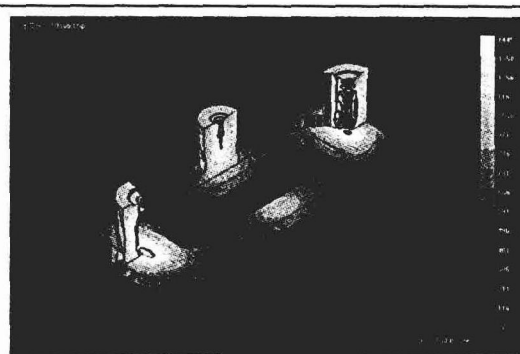


图 4 第二次点补前的凝固壳（不包括两相区）

Fig.4 Solid shell before the second feeding (mushy zone is not shown)

3. 铸件凝固宏观偏析数值模拟

宏观偏析是凝固过程中大于晶粒尺度的合金成分不均匀分布现象，其形成是溶质浓度较高的液相流动和固相移动所产生的溶质宏观迁移。引起流动的原因包括：凝固收缩和冷却收缩引起的补缩流动；液相温度和成分不均匀分布引起液相密度的不均匀分布，在重力作用下引发的自然对流；浇注、电磁搅拌、机械振动等原因引起的强制对流；熔体中自由等轴晶的析出、型壁枝晶脱落、以及熔断枝晶产生的枝晶碎片的漂浮和沉降；热应力、金属静压力、收缩应力及作用于凝固壳的外力等造成固相骨架的变形等。在定向凝固（DS）的钢锭及叶片等铸件中，这些偏析通常呈狭长的通道状，称为通道偏析。尤其是对大型钢锭或铸钢件，由于其尺寸大，凝固时间长，经常会产生富含有害元素硫、磷的 A 型或 V 型通道偏析，同时也会出现溶质富集或溶质贫乏的正偏析及负偏析区域^[7-9]。宏观偏析不仅会导致缩松，还会造成材料的物理性能、电化学性能不均匀性，应力集中及裂纹等缺陷。由于这些铸造缺陷不能通过后续处理来消除，因而会导致材料机械性能的各向异性，大大降低材料的使用性能，甚至导致材料和铸件的报废。

对于宏观偏析形成机理的认识,虽然已经有很多观点,也取得了一定的共识,但是还有待于更进一步的深入研究。比如,对于偏析通道的具体形成位置及其内部流动等问题,在学术上仍然存在争议。深入研究宏观偏析的形成过程,有助于从物理本质上理解凝固传输现象,揭示宏观偏析形成规律。

60 年代末期, Flemings 等人在宏观偏析模拟方面作出了开创性的研究,并基于凝固固-液相界面热力学平衡、固相无扩散等假设导出了著名的局部溶质再分配方程。该模型考虑了凝固收缩所导致的流动对宏观偏析的影响,首次对逆偏析 (inverse segregation)、负偏析 (negative segregation)、正偏析 (positive segregation)、甚至通道偏析 (channel segregation) 给出了统一的数学描述。模型中,枝晶间液相流动速度采用描述多孔介质渗流的 Darcy 定律计算。这种方法在数值求解方法上是一种典型的多区域法,只能单独计算糊状区或液相区的流动,其困难在于求解过程中需要不断跟踪区域边界的变化。

在过去的三十多年,特别是上世纪 80 年代末期以后,合金凝固过程宏观偏析的数值模拟在模型的精确性等方面取得了不断的进展,但离实用化还有一段距离。到目前,描述宏观偏析的模型包括连续介质模型 (continuum model)、体积平均模型 (volume-averaged model)、体积平均的两相模型 (volume-averaged two-phase model) 及多尺度、多相模型 (multiscale/multiphase model) 等。表 1 表示这些宏观偏析模型的数学方程及主要特点。

表1 宏观偏析数学模型方程描述及特点比较

Table 1 Description and comparison of different macrosegregation models

年代	模型	方程描述	主要特点
1967	Flemings 模型	局部溶质再分配方程 +Darcy 定律	将合金凝固的成分分布与物性参数和冷却条件有机结合
1987	连续介质模型	连续方程+动量方程 +能量方程+溶质方程	假定二元合金固相、液相充分混合;视为连续介质; 采用统一方程描述
1988	体积平均模型	连续方程+动量方程 +能量方程+溶质方程	基于二元合金; 研究任意固相分数体积单元; 单区域模型
1990	Poirier 模型	连续方程+动量方程 +能量方程+溶质方程	可以描述多组元合金; 用统一方程描述固相、液相及糊状区
1991	两相模型	连续方程+动量方程 +能量方程+液/固溶质方程	两速度、两焓、两成分模型
1996	多相/多尺度模型	固/液相及固液界面连续方程+固/液 相动量方程 +固/液相溶质方程+能量方程	不同的相采用不同的方程描述; 微观传输与宏观模型联系起来; 实现多相、多尺度化

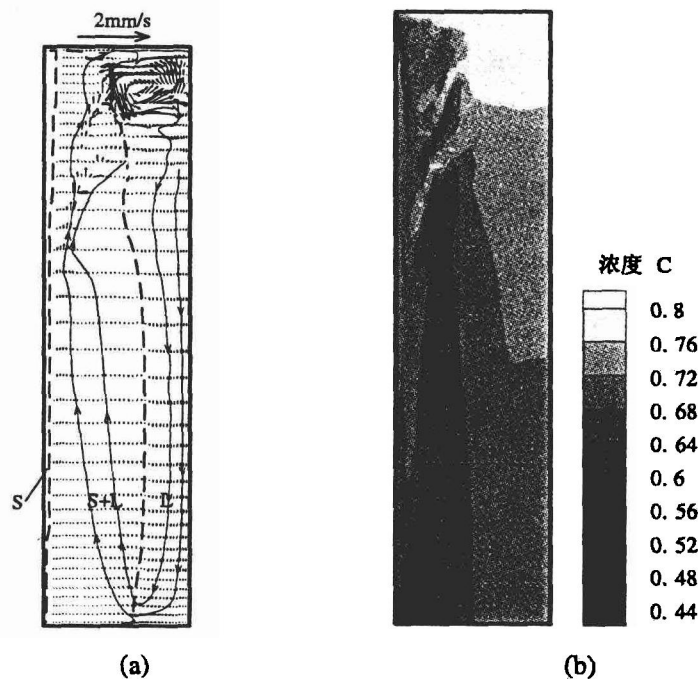
图 5 是清华大学模拟的合金侧向凝固时铸锭纵断面上的流场与 A 型通道偏析^[10]。

图 5 铸锭纵断面的流场(a)与浓度场(b)

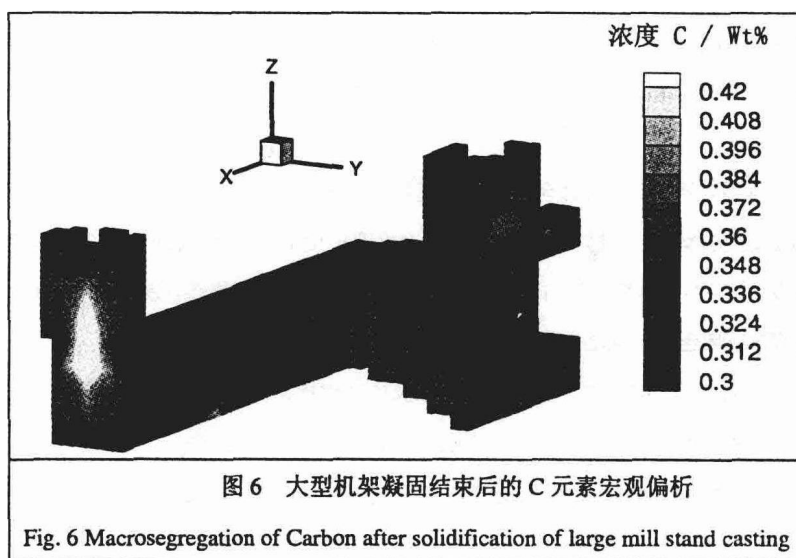
Fig. 5 Fluid flow (a) and solute concentration (b) in the longitudinal section of ingot

然而, 综合考虑凝固收缩所引起的流动与溶质和温度变化, 从而将实际铸件凝固过程宏观偏析与凝固收缩缺陷预测相结合的研究工作仍需要进一步完善。Tsai 及其合作者在连续介质模型的基础上, 建立了考虑凝固收缩影响的宏观偏析数学模型。采用此模型, Chiang 和 Tsai 模拟了带冒口的 1%Cr 钢锭在二维型腔中的传热和流动现象, 研究中考虑了凝固过程中因收缩引起的区域变化。Chang 等、Krane 等也在数学模型中考虑了收缩引起的流动对宏观偏析的影响。在 Chang 等的研究中, 模拟了 3 个简单形状铸件的凝固过程, 并考虑了凝固过程中自由表面的移动。Ehlen 和 Schweizer 采用 SOLA-VOF 法对铸锭凝固过程进行了研究, 得到了宏观偏析的分布。研究重点分析了凝固自由表面收缩对铸锭溶质再分配的影响, 计算结果描述了凝固过程中熔体自由表面的变化情况, 表明了自由表面的变化对溶质分布的重要影响。同时计算结果还成功地预测了反偏析。与以往模型相比, 控制方程中增加了自由表面的 VOF 函数。

大型铸锭及铸件常发生等轴晶沉降现象。先析出的等轴晶粒溶质成分较低, 这些固相颗粒的宏观传输会对宏观偏析产生显著影响^[11]。Ni 和 Incropera 运用 Stokes 公式, 假定固相颗粒为球状, 推导了固相自由流动区域的固相/液相相对速度, 给出了一个简化的数学模型, 为宏观偏析模型中加入等轴晶沉降的影响提供了一个方向。Vreeman 等在连续介质模型基础上, 结合 Ni 和 Incropera 给出的固相/液相相对速度方程, 模拟了合金 DC 铸造过程的宏观偏析, 得到了中心负偏析及表面的正偏析, 并对不同工艺条件对偏析程度的影响进行了研究。Krane 利用该模型研究了等轴晶沉降对合金凝固过程的通道偏析形成的影响。Beckermann 等在三相/多尺度模型基础上, 通过给定晶粒原始尺

寸及形核率的大小,考察了 Al-Cu 合金侧向凝固过程中等轴晶对宏观偏析的影响。Appolaire 等建立了一种简化的一维多尺度模型,考察了铸钢锭凝固过程等轴晶移动对宏观偏析的影响,并将计算获得的铸锭中心线上的 C 成分值与实测值进行了对比研究。最近, Ludwig 等采用多相欧拉方法,建立了描述铸件凝固过程等轴晶形核及宏观传输的数学模型,模拟了合金凝固过程。计算结果很好的预测了等轴晶的形成、底部负偏析以及柱状晶—等轴晶转变 (CET) 过程。计算工作在 Fluent 商业软件平台上进行,由于时间步长及计算规模的限制,模拟还限于较小尺寸二维简单形状铸锭的研究。

图 6 是清华大学采用综合考虑凝固收缩与等轴晶沉降模型计算得到的大型轧钢机架宏观偏析的初步结果。



总之,铸件凝固过程中的宏观偏析是一个复杂的物理过程,尽管国内外学者已经对这一现象做了大量的研究,得到了一些较为满意的结果,但是这些结果跟实际过程还有很大的差距。目前的研究还存在很多问题,如:大多数模型还是针对二元合金,或者忽略多组元间的相互影响;大多数工作主要针对二维简单形状的凝固过程进行模拟,针对三维复杂形状铸件的模拟还有很多工作值得探索;将凝固过程宏观偏析与收缩缺陷预测相结合的模拟研究工作还很少见诸报道;同时,大多数模型在实际求解过程中均假定固相静止,忽略了自由等轴晶和枝晶碎片等固相的漂浮和沉降。对铸件凝固过程宏观偏析的数值模拟研究,还有很多亟待解决的问题。

4. 结束语

本文介绍了大型铸件充型与凝固过程宏观偏析的数值模拟进展。充型过程的计算机模拟是一个相当复杂的数值模拟问题。尽管目前铸件充型计算机模拟已有很多成功的应用,但为了满足大型铸件计算规模的要求,大涡模拟可能会发挥越来越重要的作用。格子气模型是一种很有发展前途的计算方法。宏观偏析是大型铸件很难避免的重要缺陷。目前比较采用数值计算方法对实际铸件进行宏观偏析预测的研究工作还很少。计算大型铸件宏观偏析的数学模型应综合考虑凝固收缩及等轴晶沉

降等复杂冶金现象。

致谢: 作者感谢课题组研究生: 谭利坚、张雷、曹海峰等为本文所做的研究工作。同时感谢国家科技部重大基础研究“大型及精确铸造成形过程的数理建模及模拟研究”专题项目 (G2000067208-3) 的资助。

参考文献

- [1] 柳百成, 沈厚发. 21 世纪的材料成形加工技术与科学, 北京: 机械工业出版社, 2003: 1-29
- [2] 柳百成. 铸件充型凝固过程的数值模拟研究在国际学术界已占有一席之地, 中国机械工程, 1999, 10(9): 981-983
- [3] 陶盼, 廖恒成, 陈晋, 孙国雄. 铸件充型过程数值模拟的发展, 铸造, 2005, 54(3): 257-260
- [4] 张雷, 谭利坚, 沈厚发, 黄天佑, 柳百成等. 大型轧钢机架铸造工艺计算机辅助分析, 200, 铸造, 52(8): 568-570
- [5] 张焕鑫, 沈厚发, 柳百成. 薄板坯连铸流场与中心偏析的大涡模拟, 钢铁, 2006, 41(S1): 472-475
- [6] 张小军, 沈厚发. 板坯连铸结晶器流场的格子法模拟, 机械工程学报, 2006(9):
- [7] 徐达鸣, 李庆春, 安阁英. 铸件铸锭凝固传输现象及宏观偏析计算机模拟研究的进展, 铸造, 1997(4): 44-49
- [8] 韩志强, 沈厚发, 柳百成. 合金凝固过程传输模型, 金属学报, 2002, 38: 35-40
- [9] 韩志强, 沈厚发, 熊守美, 柳百成. Fe-C 合金凝固过程流动、传热、传质的耦合数值模拟, 金属学报, 2002, 38: 941-46
- [10] 曹海峰, 沈厚发, 柳百成. 侧向凝固通道偏析的数值模拟. 金属学报, 2005, 41(9): 917-922
- [11] 马长文, 沈厚发, 黄天佑, 柳百成. 等轴晶移动对宏观偏析影响的数值模拟, 材料研究学报, 2004, 18(3): 232-238

我国大型铸钢件生产的现状与关键技术

黄天佑 刘小刚 康进武 沈厚发 柳百成

(清华大学机械工程系, 清华大学先进成形制造重点实验室, 北京 100084)

(联系人: 黄天佑, 男, 1946 年 10 月生, 教授, 62796043, huangty@tsinghua.edu.cn)

摘要: 本文介绍了我国大型铸钢件行业的现状及与国外先进企业的差距, 以水电、冶金等重点工程为例分析了未来5~10年中我国大型铸钢件的市场需求情况。文中详细介绍了大型铸钢件生产中材料冶炼、铸造工艺、热处理工艺及计算机数值模拟技术等关键技术及其在大型铸钢件生产中的应用情况。

关键词: 大型铸钢件; 重大装备; 关键技术

The Review of the Production Status of Heavy Steel Castings and Key Technologies for Their Manufacturing in China

HUANG Tianyou LIU Xiaogang KANG Jinwu SHEN Houfa LIU Baicheng

(Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education.

Dept. of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing, P.R.China, 100084)

Correspondent: Prof. HUANG Tianyou, Tel: 8610-62796043, huangty@tsinghua.edu.cn

Abstract: The production status of heavy steel castings in our country and the gap compared with some advanced foreign enterprises was presented in this paper. It takes national key projects such as hydroelectricity and metallurgy as examples for analyzing and predicting the magnitude demand of heavy castings in domestic market in the coming 5 to 10 years. It also gives a particular introduction of the key technologies in the manufacturing of heavy steel castings like metal melting, foundry technology, heat treatment technology and numerical simulation technique, etc. and their practical applications in the production of heavy steel castings.

Key words: Heavy steel casting; Large and heavy equipment; Key technology

1. 引言

大型铸钢件的制造业是国家装备制造的基础行业, 其发展水平是衡量一个国家综合国力的重要标志。大型铸钢件广泛用于电站、石油化工、冶金、船舶等装备以及装备制造业, 如核电设备中的不锈钢主泵泵体、汽轮机缸体, 水电机组的转轮、叶片、上冠、下环, 火电机组中的汽缸体件, 大