

铸造过程计算机数值模拟的国内外研究概况

张红松, 张希俊, 张方

(昆明理工大学机电工程学院, 云南昆明 650093)

摘要: 铸造过程计算机数值模拟技术是当今公认材料科学的重要前沿领域. 本文从铸造充型过程数值模拟、缩松缩孔的预测、应力场数值模拟、热裂的判定、微观组织模拟及凝固模拟软件的开发等六个方面简要介绍了国内外铸造过程计算机数值模拟的概况.

关键词: 数值模拟; 充型过程; 微观组织; 应力; 热裂; 模拟软件

中图分类号: TP34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2003)02-0055-04

Present Foreign and Domestic Research on the Computer Digital Simulation of Casting Process

ZHANG Hong-song, ZHANG Xi-jun, ZHANG Fang

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The technology of computer digital simulation on casting process is an important frontal field of material science and technology, which is acknowledged by the public. The present foreign and domestic research on computer digital simulation of casting process is summarized in the paper.

Key words: digital simulation; filling process; microstructure; stress; hot cracking; simulation software

0 引言

铸造过程的数值模拟技术是本学科发展的前沿之一^[1], 包含铸件充型、凝固过程、缩松缩孔预测、应力场、热裂、微观组织的计算机模拟以及计算机模拟软件开发等研究内容. 经历了数十年的努力, 先后经过基础研究阶段、预测研究阶段和优化研究阶段, 取得了很大的进展, 部分技术已进入工程实用化阶段. 尤其是温度场的模拟技术已经比较成熟. 本文试图对国内外的研究现状作一介绍.

1 铸件充型过程数值模拟的研究概况

许多铸造缺陷如卷气、夹杂、缩孔等都与液态金属的充型过程有关. 为了控制充型顺序和流动方式, 对充型过程进行数值模拟非常必要. 其研究多数以 SOLA-VOF 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法进行研究改进. 有的研究在对层流模型进行大量实验验证之后, 用 $K-\epsilon$ 双方程模型模拟铸件充型过程紊流现象.

目前, 虽然已研究了许多算法, 如并行算法、三维有限单元法等, 但最好的算法仍然没有找到. 常用的网格划分为矩形单元(2D)或正交平行六面体(3D)^[2~4]. 日本的 I. Ohnaka 等人提出了无结构非正交网格, 这种技术是通向较高精度充型模拟的可能途径之一. 砂型铸造的充型模拟研究在铸造过程计算机模拟中占主导地位, 然而消失模铸造、金属型铸造等充型模拟的研究工作已经开始. 充型模拟的另一发展趋势是浇注系统辅助设计, R. McDavid 和 J. Dantzig 在这方面进行了尝试, 并取得了一定的成果^[4,7].

收稿日期: 2002-08-30.

第一作者简介: 张红松(1976-), 男, 硕士, 副教授; 主要研究方向: 计算机模拟材料加工技术.

2 缩松、缩孔预测的数值模拟研究概况

铸件缩松、缩孔形成的模拟预测是铸件充型凝固过程模拟软件的主要功能之一。目前国内外常用的凝固模拟软件中均提供了多种判据用于铸件缩松、缩孔的预测。但是,大多数判据均是在用于铸钢件或不含石墨的铸造合金时比较有效。由于石墨铸铁凝固时析出比体积较大的石墨,因此其体积变化较铸钢等复杂得多,必须采用专门的判据。

铸钢件缩松、缩孔预测判据经过多年的发展,从最初的定性温度场热节法,发展到后来的 E. Niyama 提出的 $G/R1/2$ 法,再到后面的流导法、固相率梯度法等定量预测方法^[4],无论从精度还是从使用范围看,均达到了较高的水平,可以有效地预测铸件钢中的缩松、缩孔^[6,10]。

而铸铁件,特别是球墨铸铁件缩松、缩孔的预测一直缺乏可靠有效的判据。1994年,李嘉荣等在大量试验的基础上提出了球墨铸铁缩松、缩孔形成预测的“收缩膨胀动态叠加法(DECAM)”^[10-15],该法基于 Fe-C 平衡相图,用杠杆原理计算凝固过程中收缩和膨胀量,将收缩和膨胀量进行叠加,可以预测球墨铸铁件缩松、缩孔的形成。李文珍等在进行球墨铸铁微观模拟的基础上,从微观形核和生长的角度建立了球墨铸铁在凝固过程中的体积变化模型,并进一步提出了基于微观模拟的球墨铸铁缩松、缩孔定量预测方法

微观模拟法(MMM)。国外一些研究者也提出了定量计算球墨铸铁凝固过程中体积变化的模型。目前,球墨铸铁缩松、缩孔预测方法已部分投入实用化。

3 应力场数值模拟的研究概况

凝固过程热应力模拟主要针对铸件的残余应力和残余变形,现已经历了由自己开发程序、采用已有的有限元应力分析软件、铸件凝固模拟专业软件三个阶段^[8,9]。国内的研究还基本上处于第二阶段。一般采用自行开发有限元应力分析程序来处理研究连铸、半连铸及铸锭等能够简化为一维或二维的问题,软件能力弱,并缺少完善的前后处理,因此受到很大限制。大连理工大学较早的进行铸件和连铸坯的应力数值模拟。国外的一些大型通用工程有限元分析软件,如 ANSYS 等,也可用于铸件热应力的模拟。这些软件具有强大的二次开发环境,在这些软件上进行二次开发,加入适合铸造过程应力模拟的力学本构模型或边界条件处理模型,可以节省很多不必要的工作^[6]。但对于一般铸造技术人员来说,此类软件的易用性和专门开发的凝固模拟软件具有较大差距。

近几年来,国内外部分专门用于铸件凝固过程的数值模拟软件,已具有应力分析功能。同时也建立了不同的数学模型,主要有纯弹性模型、弹塑性模型、弹塑性-蠕变模型、弹-粘塑性模型、统一变量模型和最近几年发展起来的流变学模型,其中统一变量模型和流变学模型由于更接近于合金在铸造中的物理本质而逐渐成为研究的热点。流变学模型用简单的流体模型和力学模型来描述铸造合金在固液两相区的流动及变形规律,从而准确地反映流动变形随时间的变化。另一种新的方法是将 FDM(有限差分法)和 FEM(有限元法)方法相结合^[7,12,18],利用 FDM 分析流动与传热,用 FEM 计算应力。

应力场数值模拟虽然取得了一定的进展,但整体还处于初步研究阶段,离实际应用还有一定距离。

4 热裂数值模拟研究概况

热裂是铸件最严重的缺陷之一,本世纪初,铸造工作者就开始研究热裂形成机理。迄今,在大量研究的基础上已经提出了几种不同的理论,如强度理论、液膜理论、综合理论等^[1]。归纳出热裂的主要特征及影响因素如下^[19-21]:

(1) 热裂产生于准固相区内靠近固相线温度的一定温度范围内。

(2) 热裂一般发生在收缩受阻的热节处,此处热裂形成温度范围内的凝固速度、补缩能力及该处的折算厚度均对热裂的生成有直接的影响^[2]。

(3) 铸型的热膨胀及其对铸件收缩的阻碍程度决定了该热节处应力水平的高低。

基于上述认识,有人提出从定量角度去预测热裂,认为热裂与热节处凝固前沿的运动速度以及该处的

应变速度有关,当其他因素不变时,这两个速度的比值即可作为判据.另外一种判据综合考虑上述所有因素,提出了如下公式: $K_w = T^{k-1/2}/G^{k-1}$,其中 G, T 分别表示温度梯度和冷却速度,当 K_w 小于某一临界值时就会有热裂产生^[2].

目前热裂的模拟和预测可归纳为如下四种方法:①基于凝固条件与补缩能力,采用凝固与补缩模型;②基于铸件高温应力应变场;③基于一维受阻模型;④基于流变学模型.其中基于流变学模型的热裂模拟是近几年发展起来的新方向,其先决条件是铸造合金流变参数的测定^[14,16,22].铸造工作者先后测定了 ZL203 合金, Al-Si 合金, Al-Si-Cu-Mg 合金的流变行为,及 ZG35, ZG45, ZG15CrMoV, 624 等钢种和 ZQSn16-5 铜合金的流变性能.刘驰采用一维流变模型模拟了带有约束端的 Al-Cu 棒形试件和应力框的热应力应变,判断了热裂的形成情况,程军用自行开发的三维轴对称热应力软件预测了 Al-Cu 合金的热裂形成.上述的热裂判据都把应力应变的变化规律作为静态来处理,实际上不应只以接近固相线凝固的塑性应变、弹性应变极限和粘弹性应变极限的相对大小以及应力的相对大小作为热裂判据,由于三种应变都具有时变性,只有动态地考察三种应变的时变性,才能建立比较准确的热裂判据.所以,目前的热裂理论尚不能对热裂进行定量描述^[4-6].

5 微观组织模拟的研究状况

微观组织模拟可通过计算机模拟来预测铸件微观组织形成,进而预测铸件的力学性能和工艺性能,最终控制铸件的质量.微观组织模拟可分为三个层次: mm、 μm 和 nm.宏观量如温度、速度等可以利用相应的方程,通常采用有限元或有限差分求解,而在微观领域内则采用解析法来分析枝晶端部、共晶薄层或球粒的动力学生长.近年来,随机方法如 Monte Carlo 法或 Cellular Automaton 法已经被用于晶粒组织形成及生长的模拟中^[2].现在已能够模拟枝晶生长,共晶生长,柱状晶与等轴晶转变等合金微观组织变化.

最近, Rappaz 等人对凝固过程中的枝晶组织模拟进行了回顾,评述了随机论方法和决定论方法的发展状况.相对比较而言,随机论法则只能将能量方程与形核和生长结合起来;而决定论模型可以把凝固过程中所涉及物质守恒方程与晶粒形核和生长的微观模型结合起来,无疑更接近于实际过程的物理机制.特别是它考虑了宏观偏析和固态传输.随机论法更适合于描述柱状晶粒组织的形成及柱状晶和等轴晶的相互转变^[5,25,24].

一些学者阐述了三维 Cellular Automaton 有限元模型(CA-FE)模拟的原理及应用. FE 法用来计算三维铸件的温度场, CA 形核和生长算法则用来预测晶粒组织的形成.二者耦合可以对枝晶生长动力学和潜热释放进行模拟.

相场法的研究是直接微观组织模拟的热点.相场理论通过微分方程反映了扩散、有序化势及热力学驱动力的综合作用.把相场方程与温度场、溶质场、流速场及其它外部场耦合,则可对金属液的凝固过程进行真实的模拟.已有的工作包括^[5-7,16,18]:①多个晶粒生长时多元相场的耦合,②枝晶生长过程中相场与温度场或溶质场的耦合,③在包晶和共晶凝固中双相场与溶质场的耦合,④当存在强迫对流时相场速度的耦合.

球铁微观组织的模拟仍是主要的研究方向之一,国内外目前的研究水平基本相当. G. Lesoult 使用球铁凝固的物理模型,模拟了过共晶与共晶球铁冷却中非共晶奥氏体的形成,并重新讨论了模糊区的概念. M. Roman 预测了亚共晶和过共晶球铁的微观组织,重点强调了共晶前和共晶阶段的凝固,用圆柱形阶梯试样进行了模拟和试验的比较.大连理工大学金俊泽领导的研究小组在铸件的凝固组织微观模拟方面也卓有成效.但总的看来,目前模拟对象都是集合形状简单的小试样,离实际工程应用还有一段距离.为完善铸件凝固过程的微观模拟,还需要解决以下两个问题:①建立实际合金的晶粒生长模型②完善算法,优化算法,尽量减少计算量,以能计算形状复杂的铸件.

6 凝固过程模拟软件的开发状况

铸造 CAE 的研究开发起步于 20 世纪 60 年代,主要在以下三个方面取得了重要突破才使商品化软件

变为现实。①有处理三维复杂形体的图形功能;②硬件及软件的费用大幅度降到铸造工厂能接受的水平;③计算机操作系统及软件对用户友好^[1]。自从1989年世界第一个铸造CAE商品化软件—MAGMA展出以来,凝固软件的发展过程大致可分为三代:①第一代主要运用简单模数计算方法模拟热流动,不能显示某一时刻铸件或铸型特定区域的温度场变化,也不能正确模拟具有相邻影响的复杂形状铸件的温度变化;②第二代主要基于正确的温度场计算;③第三代模拟软件运用正确温度场计算并与凝固期间补缩金属流动相结合,同时对凝固过程合金中的重量影响和密度及合金结晶变化加以分析,可在选定的任一截面以二维和三维实体方式显示模拟结果,并同时显示温度变化、液固相变化及缩孔变化^[9,20,21]。目前发达工业国家都有自己的商品化模拟软件,如著名美国的ProCast,德国的MAGMA,芬兰的CastCAE,西班牙的ForCast,日本的CASTTEM,法国的SIMULOR,瑞典的Novasolid等,许多软件可以对砂型铸造、金属型铸造、精密铸造等进行温度场、流场及应力场模拟,预测铸件的缩松、缩孔、热裂等缺陷和各部位的组织。其功能一方面正向低压铸造、压铸、熔模铸造等方面发展,另一方面正从宏观模拟向微观模拟发展。其中美国的ProCast和德国的MAGMA已增加了球墨铸铁组织中球墨球数及珠光体含量的预测功能^[3,12,14,17]。在这方面国内起步较晚,但进展迅速,已开发的商品化软件主要有清华的FT—star,华中科技大学的华铸CAE,其部分功能已与国外软件相当。另外实现铸造CAE在并行工程中的集成是人们目前关注的焦点^[1,9]。

7 结论

(1) 铸件充型过程模拟还没有找到一个最好的算法,砂型铸造模拟仍占主导地位,其它形式的模拟已经起步,辅助设计浇注系统是充型模拟的一个发展趋势。

(2) 缩松、缩孔的预测是大多数凝固模拟软件的主要功能之一,铸钢件缩松、缩孔的判据已经十分有效,球墨铸铁缩松、缩孔的预测方法已部分投入使用。

(3) 铸造应力场及热裂模拟虽然取得了一定的进展,但整体离实际应用还有一定的距离。

(4) 微观组织模拟是目前研究的热点,研究方法主要有确定性法、概率论法和相场法。在实际生产中推广应用还需要解决建立实际合金的晶粒生长模型及完善模型、优化算法、减少计算量等问题。

(5) 铸造CAE软件先后经历了三代的发展,软件功能正进一步增强,我国起步较晚,但软件部分功能已与国外相当。铸造CAE在并行工程中的集成也是人们关注的焦点之一。

参考文献:

- [1] 柳百成,荆涛等编著.铸造工程的模拟仿真及质量控制[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [2] S.M.Xiong,B.C.Liu.Numerical simulation of modling filling and heat transfer of high pressure die casting[J].Proceedings of Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidificatio IX,Germany,2000.
- [3] Proceeding of International Conference on Modeling of Casting, Welding and Advanced SolidificationProcesses VII[J].June 7—12,San Diego,U. S. A, TMS Publication,1998.
- [4] Jolly M R,Wen S W,Campbell J.Modelling and Simulation in Metallurgical Engineering and Materials Science,ed.[J].Y.Zongsen,Metallurgical Industry Press,Beijing,1996,540~546.
- [5] 陈立亮,刘瑞祥,林汉同.我国铸造行业计算机应用的回顾与展望[J].铸造,2002,(2):63~67.
- [6] 林家骝,朱世根等.铸钢件凝固过程三维温度场热应力场的数值模拟与缩孔(缩松)的热裂的判定[J].铸造,1993,(10):1.
- [7] Goettsxh D D,Dantzig J A.Modeling Micostructure Development in Gray Cast Irons[J]. Metall And Maters,TransA,1994,25A:1063~1079.
- [8] 金俊泽,王宗廷等.金属凝固组织形成的仿真研究[J].金属学报,1998,3(9):10~15.
- [9] 张世辉,周佩超等.铸件凝固过程计算机数值模拟软件在生产中的应用[J].铸造,1999,(5):18~21.
- [10] Jeffery W.Wiese,Jonathan A.Dantzig.Modeling Stress Development during the Solidification of Gray Iron Castings.Metalurgical Transactions A,1990,21A:489~497.
- [11] 朱育兵,张希俊.台车凝固过程的数值模拟和工艺优化[J].昆明理工大学学报(理工版),2002,27(1):63~65.