

熔模铸造过程数值模拟

—国外精铸技术进展述评(11)—

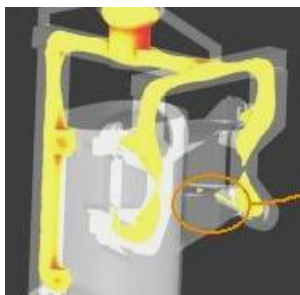
《特种铸造及有色合金》，2005（11）：683-686

20世纪90年代以来，国外一大批商业化铸造过程数值模拟软件的出现，标志着此项技术已完全成熟并进入实用化阶段，有相当一部分已成功用于熔模铸造。其中，AFSolid(3D)(美国)、PASSAGE/POWERCAST(美国)、MAGMA(德国)、PAM-CAST(法国)、ProCAST(美国)等最具代表性。尤其值得一提的是由美国UES公司开发的ProCAST，和美国铸造师协会(American Foundrymen's Society)开发的AFSolid(3D)，它们代表了二种不同类型的软件系统。

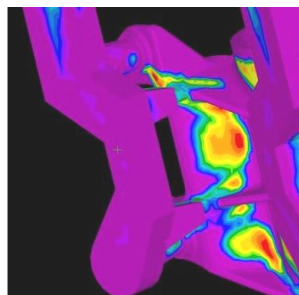
一. 熔模精密铸造过程数值模拟的佼佼者——ProCAST

早在1985年，美国UES Software Co.便以工程工作站/Unix为开发平台，着手开发ProCAST^[1]。为了保证模拟结果的准确性，ProCAST一开始就采用有限元方法(FEM)作为模拟的核心技术。自1987年起，开发用于熔模铸造(精铸)的专业模块。1990年后，位于瑞士洛桑的Calcom SA和瑞士联邦科技研究院也参加ProCAST部分模块的开发工作。2002年，UES Software和Calcom SA先后加盟ESI集团(法国)。通过整合，ESI集团在虚拟制造领域的领先地位进一步增强。

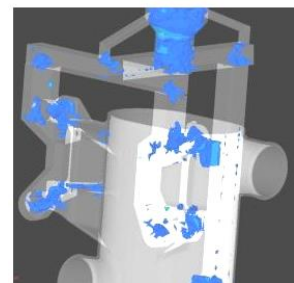
现在，ProCAST也有微机/Windows或Windows NT版本。三维几何造型模块支持IGES、STEP、STL或Parasolids等标准的CAD文件格式。Meshcast模块能自动生成有限元网格。它的凝固分析模块可以准确计算和显示合金液在凝固过程的温度场、凝固时间，以及固相率变化，同时，从孤立液相区、缩孔/缩松体积分数、缩孔/缩松Nyama(新山英辅)判据等三方面，帮助铸造工程师分析判断缩孔/缩松产生的可能性和具体位置(见图11-1)^[2]。针对熔模铸造热壳浇注的特点，ProCAST传热分析模块考虑到热辐射对温度场和铸件凝固过程的影响，这对于经常需要处理热辐射问题的熔模铸造而言特别重要。例如，对不锈钢人体植入物的凝固过程进行模拟时，发现位于模组中部的铸件由于接收到的辐射热比周边铸件多，因而温度偏高，不利于铸件顺序凝固，容易产生缩孔、缩松^[1]。特别值得一提的是，ProCAST特有的辐射分析模块，计及辐射线入射角和遮挡物的影响，模拟对象一旦因相互运动导致辐射线入射角改变或产生遮挡，该软件将重新自动进行计算，特别适用于定向凝固和单晶铸造。



a) 孤立液相区



b) 缩孔 / 缩松体积分数



c) Nyama (新山英辅) 判据

图 11-1 ProCAST 缩孔 / 缩松判据

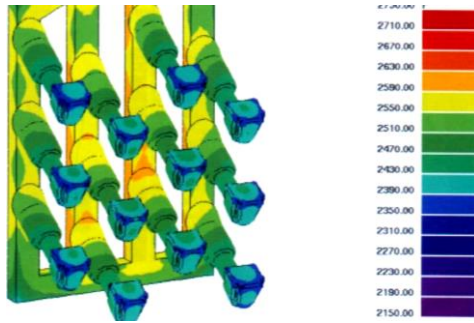


图 11-2 热辐射对模组温度场的影响

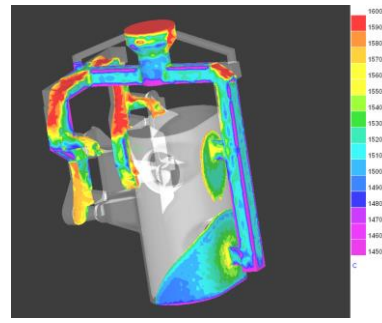


图 11-3 流场与温度场耦合计算

自 1992 年起, ProCAST 的流动分析模块便能通过 Navier-Stocks 流动方程进行流场计算, 同时与传热过程耦合(图 11-3)^[2]。不仅模拟金属液的充型过程和状态, 同时还将温度场变化显示出来, 预测冷隔和浇不到等铸造缺陷(图 11-4)^[2]。此外, 它还可以模拟流体通过多孔介质(例如陶瓷过滤器)的流动状态, 预测放置过滤器后可能出现的倒流、噎流等现象(图 11-5)。此外, 该软件的又一特色是, 流动分析模块中, 可以对诸如精铸模料在内的非牛顿流体的充型行为进行模拟(图 11-6)^[1]。

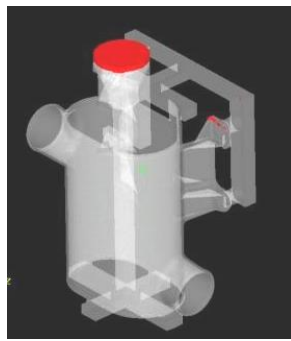


图 11-4 浇不足缺陷预测

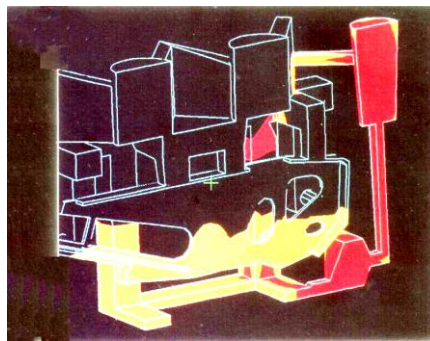


图 11-5 由于过滤器使用不当造成噎流

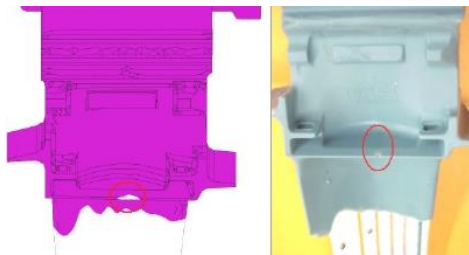


图 11-6 空心叶片蜡模充型过程模拟结果(左)与实验结果(右)比较

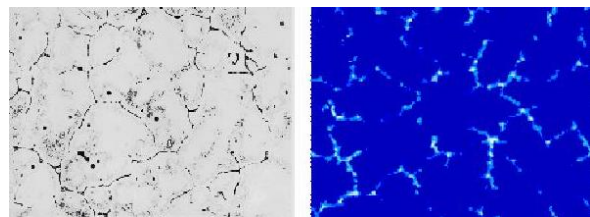


图 11-7 铝-镁合金晶间疏松模拟结果(右)与实验结果(左)比较

1994 年美国国家航空航天总局(NASA)在调查评估的基础上推荐该软件为美国航空航天领域铸造过程 CAE 的首选软件。其后, 包括美国 Howmet、Pratt & Whitney、PPC、GEAE 以及英国 Rolls-Royce 等世界著名航空航天精铸企业纷纷选择 ProCAST 作为铸造工艺分析和新产品开发的重要工具。

图 11-8 所示为 ProCAST 新近发布的对整铸涡轮残留应力模拟和裂纹预测结果^[3]。

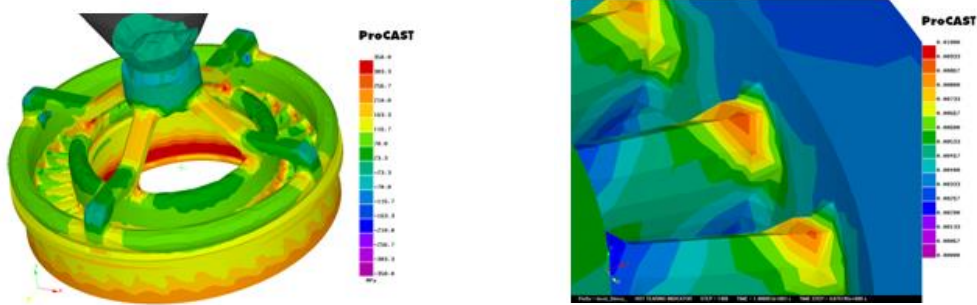


图 11-8 整铸涡轮残留应力模拟（左）和裂纹预测（右）

ProCAST 2004 公布的对铝-镁合金晶间疏松(图 11-7)^[4]、整铸涡轮铸造晶粒结构模拟(图 11-9)^[3]，和空心单晶叶片晶体生长过程的模拟结果(图 11-10)^[3]，标志着该软件已经将铸造晶粒组织和微观结构模拟提升到一个新水平。

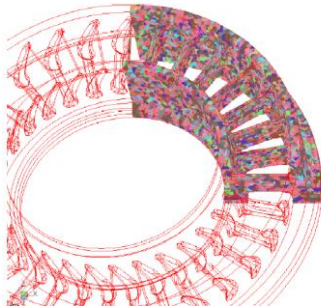


图 11-9 整铸涡轮铸造晶粒结构模拟

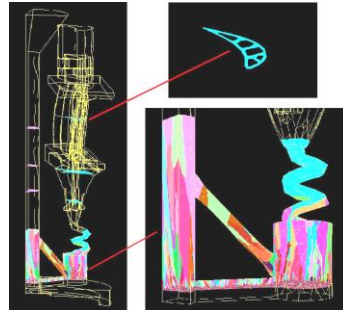


图 11-10 单晶铸造空心叶片单晶生长过程模拟

二、充型-凝固过程模拟和浇道优化设计一步完成^[5]

AFSolid 开发始于 1985 年，它最初是以微机/DOS 为平台的一套二维系统，1993 年后升级为三维。三维几何造型模块支持 AutoCAD 以及 IGES、STL 和 DXF 等几何图形文件格式。计算方法采用有限差分法。流动和传热计算进行了适当的简化处理，可以说是一种简化版的模拟软件，适用于包括砂型、熔模、金属型、压力铸造等在内的多种铸造方法。其功能虽不能和 ProCAST 等高档软件相提并论，但价格便宜，目前在全球 40 多个国家拥有 410 多用户，其销售量号称世界之最，用户大多为生产商业铸件的中小型精铸厂。近来，美国 Finite Solutions Co. 与美国铸造师协会合作，将多变量优化运算软件链接到 AFSolid 凝固模拟软件中，使凝固过程模拟与工艺优化一步完成，模拟的工作效率大为提高。

众所周知，仅仅通过一次模拟，其结果往往很难令人满意，所以工程技术人员就必须根据自身的经验和知识对首次模拟结果进行分析，修改工艺方案和设计，再进行下一轮模拟，经过反复多次模拟和修改，最终才能获得满意的工艺方案或参数。可见，这种方法其实是用计算机试错法来代替生产现场的试错法。当然效率明显提高，也降低了成本。但是，计算机反复试错，也需要耗费较多的机时。针对这一问题，美国 Finite Solutions Co. 提出将多变量优化运算软件链接到 AFSolid 凝固模拟软件中，进行二次开发，使模拟与优化一步完成，从而使计算机模拟的效率大为提高。

其实，目前已经有不少现成的商业软件可用来进行工程问题的优化运算。Finite Solutions Co. 从中选择了当前流行于汽车零部件和结构设计的 HyperOpt (开发商: Altair Engineering Inc.)。

优化运算通常要求有三个前提：即设计变量、约束条件和目标函数。

设计变量是指具体的设计特征，可以是几何特征，如冒口直径、高度，横浇道和内浇道尺寸等，也可以是工艺参数，如浇注温度、型壳焙烧温度等。设定设计变量时需要给出最大、最小和正常值。

约束条件是指工艺条件的上限和下限。约束可被指定为一个最小值(所得的最终结果数值应等于或大于给定的约束值)或最大值(所得的最终结果数值应等于或小于给定的约束值)。每一次优化运算，可以指定一个或多个约束，例如约束可以是允许存在的最大的疏松级别或可以接受的最低的工艺出品率等。

目标函数是指预期目标。用户只能选择一个目标函数并指定该函数的最佳值(最大或最小值)。例如如果以缩孔缩松程度为目标函数，此时最小值为最佳；如果选择工艺出品率作为目标函数，当然最大值最佳。值得强调指出的是，每一次优化运算，只能指定一个目标函数。

模拟-优化运算步骤下:

首先建立一个初始的工艺设计，包括浇注补缩系统和铸件的三维几何模型和所有相关材料的数据；然后选择设计变量、约束和目标函数；再启动软件自动进行模拟-优化运算，计算机运行过程中不断按原先设定，自动更改设计变量，检查是否违反了约束条件，搜索并确定目标函数最佳值。

从缩短模拟计算时间的角度考虑，计算方法采用有限差分比有限元法更为有利。而AFSolid的计算方法正是采用有限差分法，所以运算速度快。例如对一个需要上百万甚至更多单元才能准确表达清楚的复杂铸件，在目前新型的个人电脑上进行一次模拟计算，运行时间还不到30min。需要进行16次连续模拟的优化运算也只要一天就轻松地完成了。而采用某些其它软件进行类似的工作往往需要几周时间。

应用实例 —— 不锈钢精铸接头重 13.2 磅。图 11-11a 所示为原始铸造方案。由图 11-11b 所示凝固时间模拟结果可见，其顶部红色部位正处在横浇道下方，受横浇道高温区热辐射影响冷却慢，得不到有效地补缩，容易产生缩松。

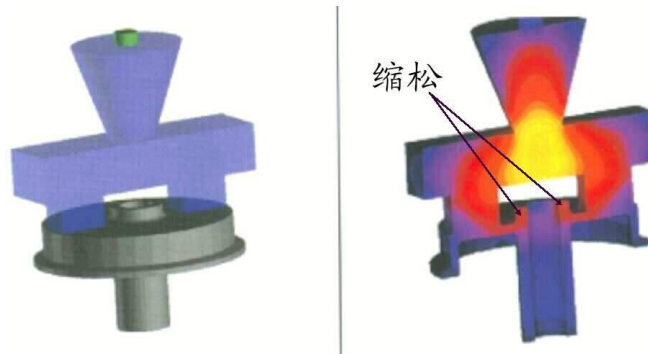


图 11-11 不锈钢精铸接头原始铸造方案及模拟结果
a)铸造方案 b) 凝固时间模拟结果

更改设计变量包括内浇道尺寸(只改动水平方向尺寸，图 11-12 上)和横浇道尺寸(水平和垂直方向尺寸同时改动，图 11-12 下)，总共更改 3 个设计变量；以铸件材质密度最小值为健全铸件的 99.8%作为约束条件(即疏松度最大值为 0.2%)；以工艺出品率最大为目标函数。然后进行包含 15 次模拟(含充型分析)的模拟-优化运算。在 Pentium III-1GHz 微机上运行只需 1 小时零 7 分钟。每完成一次模拟，系统都会自动更改浇道尺寸，同时，进行网格剖分，建立新的型壳几何模型，应用热辐射观察因子计算型壳温度场。

采用经模拟-优化的工艺设计后(图 11-13 上)，缩孔已从铸件中被排除到浇道中(图 11-13 下)，缩松减少 50%以上。对比图 11-11a 和图 11-13 上，内浇道减小为原先的 85%，而横浇道

水平和垂直尺寸分别减小到为原先的 53%和 86%，浇注系统总重量减少了 6.75kg，工艺出品率由 30%增加到 46%。按每年生产铸件 2500 件计，每年节省金属材料费用 37500 美元，省电 16500 kW h。

三. 当前推广应用计算机仿真技术存在的问题

1. 数据库数据匮乏

数据库数据匮乏是当前熔模铸造过程仿真技术普遍存在的问题。某些材料（例如特殊合金材料和某些型壳材料）的热物理性能数据，尤其是界面传热系数，很难寻觅。国内情况就更为严重，各种合金和型壳材料的热物理性能数据几乎全部来自国外文献资料。真正按照国内材料和工艺，由实验方法实际测出的数据可以说是一片空白，这不能不说是一个很大的缺憾。对比国外，早在 1978 年,美国精铸年会上发表的题为“Factors Affecting The Solidification of Investment casting”、“Fundamentals of Solidification”和 Arizona 大学长达 100 页的长篇论文“*The Thermal Conductivity of Shell Investment Materials*”，为建立熔模铸造过程仿真所需的基础数据库奠定了坚实的基础。而 ProCAST 除内含基本的材料性能数据库外，还拥有独特的合金热力学数据库。它以新兴的计算材料学为基础，由英国的 ThermoTech 公司开发。利用这个独特的数据库，用户只需输入合金化学成分，计算机便可自动求出液、固相线温度、凝固潜热、比热容和合金密度随温度的变化等热物理性能参数。

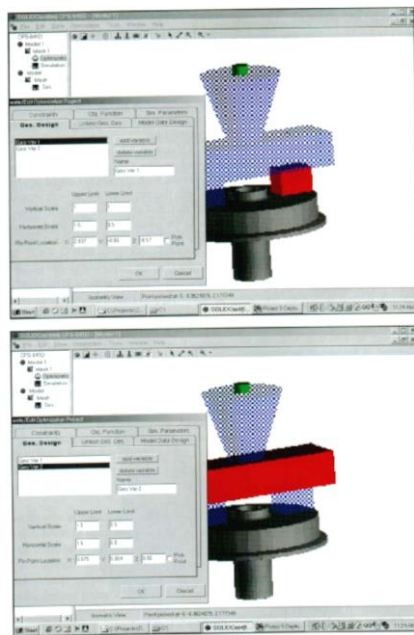


图 11-12 更改设计变量
(上——更改内浇道尺寸，下——更改横浇道尺寸)

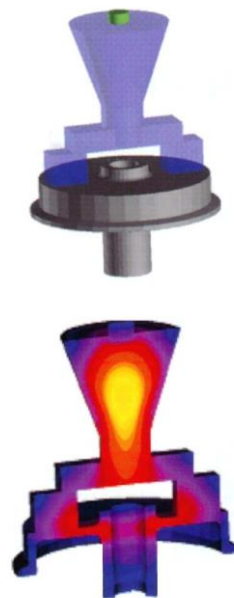


图 11-13 更改后的工艺设计(上)
和模拟结果(下)

2. 图形数据文件标准化和相互交流

CAD 数据文件的转换和标准化也是一个十分重要的问题。不同国家、地区、部门，不同厂家和单位，使用的 CAD 软件不尽相同。不同类型的 CAD、CAM、CAE (例如铸造过程数值模拟) 以及快速成形机，也都有各自支持的 CAD 文件格式。如果这些 CAD 文件相互之间不能转换和交流，那么信息时代和经济全球化的优势就难以发挥，工作效率也将大打折扣。

不同 CAD 软件之间数据转换通常有二种方法，即直接通过数据转换器（模块）和通过标

准的数据文件交换格式转换。

- 通过数据转换器（模块）转换 如果 CAD 软件中有现成的转换器（模块），就可以直接用它来实现不同类型文件相互转换。这种方法的局限性是不同 CAD 软件，甚至不同版本，往往需要不同的转换器。相对目前流行的 CAD 版本而言，这种方法不免有相形见绌之感。一些较新版本的 CAD 软件也可通过‘文件’—‘输入’/‘输出’来转换文件类型和格式。
- 通过标准数据文件转换 新建的 CAD 文件完成后，只需将它另存为一个标准的数据文件交换格式，即可方便地与其它 CAD 软件进行交流。常用的标准 CAD 数据文件交换格式有 IGES (International Graphics Exchange Standard)、STEP (Standard for Translation of Electronic Products)、STL 和 Parasolid。IGES 是一个比较老的工程图形文件转换标准格式，由于它对处理二维图形也有效，所以，目前仍有应用。STEP 是一种 ISO 标准(10303)。它是专门为转换三维实体模型和相关数据而开发的。它还可以转换某些非几何特征数据，例如图层、颜色、尺寸、附注等。当前，实现 CAD 数据文件交换，建议最好选用 STEP 和 Parasolid 这二种格式，以减少转换过程中数据丢失和缺损。在和快速成形机进行交流时，则是以输出 STL 格式文件为佳。

3. 相关人员技术水平和素质

要提高数值模拟的准确性、可靠性和工作效率，从事此项工作的技术人员不仅需要具备操作计算机的基本知识和技能，熟练掌握三维 CAD 造型及有关模拟软件，同时，还需要深入理解与数值模拟相关的物理概念，特别是需要有相当丰富的精铸工艺实践经验，以便正确设置初始条件、边界条件，分析模拟结果，采取有效的应对措施。为满足上述要求，就目前国内情况而言，技术和管理人员的水平和素质均亟待提高。

参 考 文 献

- 1 Adi Sholapurwalla. The Virtual Casting: Process Simulation For The Investment Casting Industry. INCAST 2002(12): 20~23
- 2 陈冰、荆剑. 从虚拟到真实——换热器壳体的虚拟熔模铸造. 中国铸协：第六届中国铸造厂长（经理）国际会议论文集，上海，2004: 228~235.
- 3 Loic Calba、Dominique Lefebvr、Xiaojun Yang. Modelling the Investment Casting Process. 中国铸协：第四届有色合金和特种铸造国际会议论文集，上海. 2005: 162~169.
- 4 阳晓军. The Theory And Application (Shape Casting, Continue Casting And Welding)of FEA Simulation In Metal Solidification And Microstructure Analysis.ESI 集团：数值模拟与工程应用研讨会论文集，北京.2004 : No.3 :1~16.
- 5 David C Schmidt. One Step Beyond: From Simulation To Optimization. INCAST 2002(5):18~23.