

熔模铸造过程数值模拟

——国外精铸技术进展述评(11)

陈冰

(北京航空航天大学)

摘要 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地用于熔模铸造。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2种不同类型的软件系统。

关键词 熔模铸造;数值模拟;计算机应用

中图分类号 TG249.5;TP391.9

文献标志码 A **文章编号** 1001-2249(2005)11-0683-04

1 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)。通过联合,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Nyima(新山英辅)判据等3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

收稿日期:2005-10-07

第一作者简介:陈冰,男,1938年出生,教授,北京航空航天大学,通讯地址:北京航空航天大学院内803楼1403室,北京(100083),电话:010-82313235, E-mail:chenb803@yahoo.com.cn

7 涂撒混合粘结剂浆砂陶瓷型铸造工艺的优点

7.1 混合粘结剂稳定性好,便于组织生产

硅酸乙酯水基粘结剂即使是冬天,也只能存放2d左右,夏天更短,一般只能现配现用,组织生产较为麻烦。而制备的混合粘结剂性能稳定,即使是夏天也能存放1周以上,冬天更长,因此便于组织生产,有利于生产效率的提高。

7.2 工艺更简便,更利于推广应用

由于混合粘结剂存放时间长,可制备1周的用量。这与硅酸乙酯水基粘结剂现配现用比较,大大节省配料时间,而且使用方便。特别是将涂敷浆砂造型改成涂撒浆砂造型意义更大。“涂敷”和“涂撒”虽说是一字之差,但两者的操作有难易之分。前者需用两人同时操作,这两人要求配合默契,操作要求高,需要具有一定技术素质的人员操作;后者是一人先涂刷浆料,另一人撒砂,操

作要求不高,更有利于推广应用。

7.3 陶瓷薄壳强度提高

采用混合粘结剂配料制造的陶瓷薄壳,无论是从手感还是经过喷烧和浇注实践验证,都证明型壳强度比原来的高,有利于精铸件质量的提高。

7.4 生产成本降低

制造的陶瓷薄壳厚度通常为2~4mm,耗用的贵重材料并不多,但硅酸乙酯价格昂贵。改用混合粘结剂,通过成本核算,只占硅酸乙酯水基粘结剂成本的1/2,所以采用涂撒混合粘结剂浆砂陶瓷型工艺生产成本降低。

参 考 文 献

- 1 罗守信,胡本炎,陆仲生等.武汉21t千年吉祥钟的造型实践——涂撒浆砂陶瓷型新工艺.特种铸造及有色合金,2000(3):38~40
- 2 罗守信,盛玉海,刘佑年.混合粘结剂-水玻复合型壳精密铸造新工艺.特种铸造及有色合金,2005,25(10):620~622

(编辑:张振斌)

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(见图2),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。

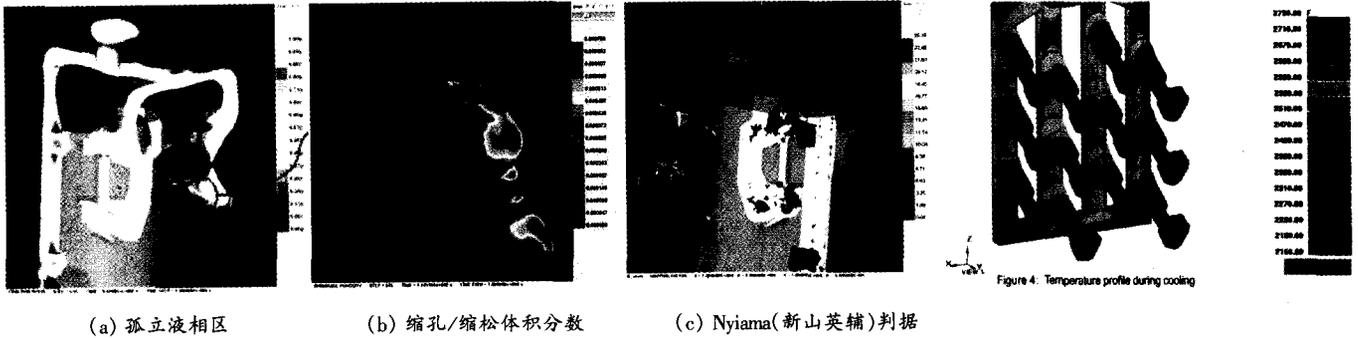


图1 ProCAST 缩孔/缩松判据

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(见图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(见图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(见图5)。此外,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,是该软件的又一特色(见图6)^[1]。

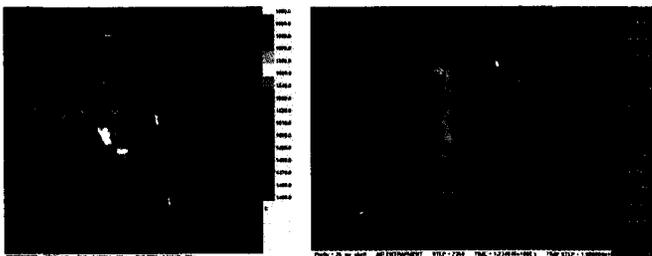


图3 流场与温度场耦合计算

图4 浇不足缺陷预测

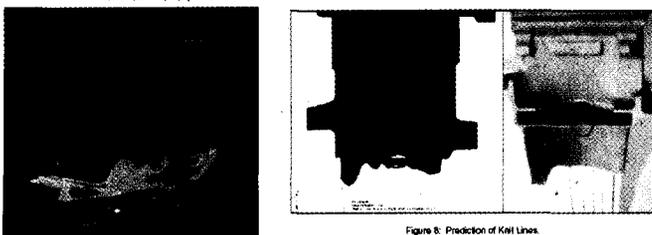


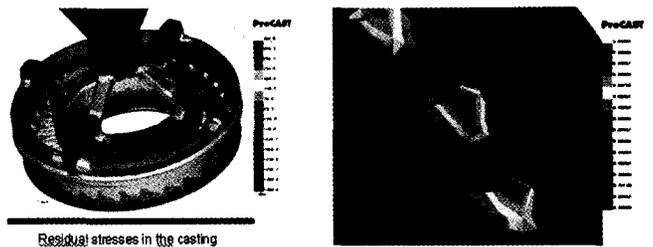
图5 由于过滤器使用不当造成噎流

图6 空心叶片蜡模充型过程模拟结果(左)与试验结果(右)比较

图7为 ProCAST 新近发布的对整铸涡轮残留应力模拟(见图7a)和裂纹预测结果(见图7b)^[3]。

ProCAST 2004 公布的对铝-镁合金晶间疏松^[4]、整铸涡轮铸造晶粒结构模拟(见图8)^[3],和空心单晶叶片晶体生长过程的模拟结果(见图9)^[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2 热辐射对模组温度场的影响



(a) 残留应力模拟

(b) 裂纹预测

图7 整铸涡轮残留应力模拟和裂纹预测

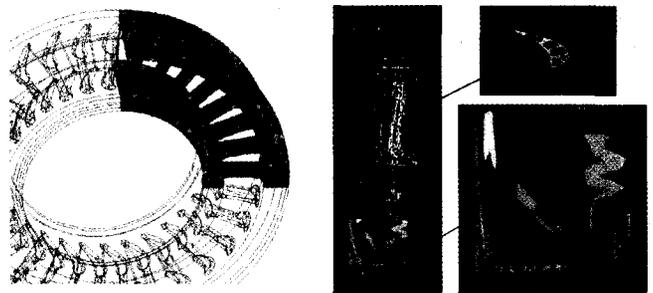


图8 整铸涡轮铸造晶粒结构模拟

图9 单晶铸造空心叶片单晶生长过程模拟

2 充型-凝固过程模拟和浇道优化设计一步完成^[5]

AFSolid 的开发始于1985年,它最初是以微机/DOS 为平台的1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多家用户,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,计算机模拟的效率大为提高。

众所周知,仅仅通过 1 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,再进行下一次模拟,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。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 3 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值、最小值和正常值。

约束条件是指工艺条件的上限和下限。约束可被指定为 1 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 1 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 1 个目标函数并指定该函数的最佳值(最大值或最小值)。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 1 个目标函数。

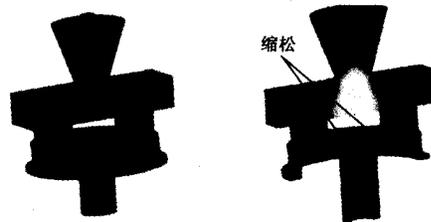
模拟-优化运算步骤如下:

首先建立 1 个初始的工艺,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法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 1 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 1 天就轻松地完成了。而采用某些其他软件进行类似的工作往往需要几周时间。

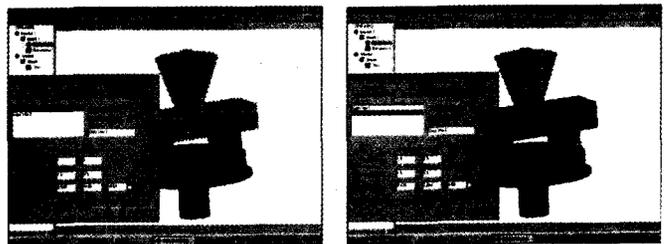
应用实例——不锈钢精铸接头,质量为 6 kg。图 10 a 所示为原始铸造方案。由图 10 b 可见,其顶部浅色部位正处在横浇道下方,受横浇道高温区热辐射影响冷却慢,得不到有效地补缩,容易产生缩松。



(a) 原铸造方案 (b) 凝固模拟结果

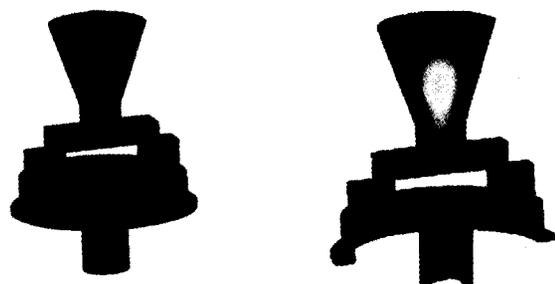
图 10 不锈钢精铸接头原始铸造方案及模拟结果

更改设计变量包括内浇道尺寸(只改动水平方向尺寸,见图 11 a)和横浇道尺寸(水平和垂直方向尺寸同时改动,见图 11 b),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 微机上的运行时间只需 1 h + 7 min。每完成 1 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。



(a) 更改内浇道尺寸 (b) 更改横浇道尺寸

图 11 更改设计变量



(a) 更改后的工艺设计 (b) 更改后模拟结果

图 12 更改后的工艺设计和模拟结果

采用经模拟-优化的工艺设计后(见图 12 a),缩孔已从铸件中被排除到浇道中(见图 12 b)。对比图 10 a 和图 12 a,内浇道体积减小为原先的 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

系统总质量减少了 6.75 kg, 工艺出品率由 30% 增加到 46%。按每年生产铸件 2 500 件计, 每年节省金属材料费用 3.75 万美元, 省电 1.65×10^4 kW·h。

3 当前推广应用计算机仿真技术存在的问题

3.1 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。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, 由试验方法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参数。

3.2 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 2 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格式转换。

(1) 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。

(2) 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, 即可方便地与其他 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 2 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, 则以输出 STL 格式文件为佳。

3.3 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 Sholapurwalla A. 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. 中国铸造协会. 第六届中国铸造厂长(经理)国际会议论文集, 上海, 2004.
- 3 Calba L, Lefebvre D, Yang X. Modelling the Investment Casting Process. 中国铸造协会. 第四届有色合金和特种铸造国际会议论文集, 上海, 2005.
- 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.
- 5 David C.S. One Step Beyond: from Simulation to Optimization. INCAST, 2002 (5): 18~23

(编辑: 张振斌)

· 书 讯 ·

《消失模铸造原理及质量控制》出版发行

由华中科技大学黄乃瑜教授主编的《消失模铸造原理及质量控制》, 反映了我国当代消失模技术最新发展水平。本书对模具发泡成形和泡沫板材数控加工成形两种消失模铸造工艺的制模、涂料配制与干燥、造型紧实、金属液充型与铸件凝固等工艺过程的控制进行了系统、深入的论述。

联系电话: 027-87557437。