

# 基于 FEFG 平台的铸造凝固过程数值模拟软件研发

杨曼云<sup>1,2</sup>

(1. 昆明理工大学, 云南昆明 650504; 2. 云南机电职业技术学院, 云南昆明 650203)

**摘要:** 基于FEFG开发平台的元件化程序设计方法和代码生成技术, 采用并行有限元自动生成系统PFEPG进行铸造过程数值模拟有限元程序的开发。开发了模拟铸件凝固过程中温度场变化、固相率场和铸件缺陷预测的铸造过程有限元数值仿真软件。与同类分析软件ProCAST的计算结果及试验测量结果进行对比, 结果显示, 所开发软件计算结果准确性及计算精度较高, 铸件缩孔缩松预测结果基本准确, 分析计算结果能满足工程实际应用。

**关键词:** FEFG平台; 凝固过程; 数值模拟

铸件充型过程的流场温度场模拟包括很多内容, 如计算域的网格划分、自由表面的处理、流场中速度和压力的求解、充型过程对凝固过程的影响、充型过程对铸造缺陷形成的影响以及计算结果的可视化等。在铸造成形方法中, 铸造凝固过程是指高温液态金属由液相向固相的转变过程。在这一过程中, 高温液态金属所含有的热量必须通过各种途径向铸型和周围环境传递, 逐步冷却并进行凝固, 最终形成铸件产品, 因此铸造凝固过程在铸造过程中的作用尤为重要。铸件凝固过程数值模拟的任务是建立铸件凝固过程中传热的数学模型, 并通过数值方法进行求解, 从而得到铸件凝固过程的规律, 预测铸件缺陷(缩孔、缩松)产生的可能性及位置。凝固过程宏观模拟, 是以模拟铸件凝固过程中温度场变化规律为基础内容的数值模拟。通过对铸件凝固过程数值模拟来预测与温度场直接相关的铸件的宏观缺陷, 如缩孔、缩松、热裂及宏观偏析等<sup>[1]</sup>。

本研究基于FEFG开发平台开发出模拟铸件凝固过程中温度场变化(热传导、对流、辐射、相变潜热)、固相率场和进行铸件缺陷预测的有限元数值仿真软件, 进行铸件凝固过程中温度场变化规律和铸件缺陷预测。并结合实际铸件模拟试验内容, 对研制软件模拟结果和国外通用软件模拟结果进行对比, 并结合企业现场铸造, 检验自主研发软件和ESI/ProCAST模拟计算结果及与实践试验结果的符合率。形成铸件凝固过程理论分析、试验测量和数值模拟分析的标准流程, 使传统铸造工艺设计从经验设计变得科学化。

## 1 铸造凝固过程数值模拟数学模型

铸件在凝固过程中包括热传导、热对流、热辐射等传热现象。金属液通过浇注系统注入铸型中后, 其内部的热量通过热传导达到铸件表面, 接着通过热辐射和热传导传递给铸型, 再通过热传导达到铸型的外表面, 最后通过热辐射和对流散失到环境中, 同时铸型内的液态金属不断下降, 且不均匀, 这种不均匀造成了铸型型腔中的液态金属的热对流。铸造凝固过程瞬态温度场的数值模拟就是求解Fourier导热微分方程, 数学模型见式(1)。

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

作者简介:

杨曼云(1973-), 女, 博士, 教授, 主要从事机械设计及理论、制造业信息化、CAD/CAM/CAE技术工业应用工作。电话: 15925208408, E-mail: manyunyang@163.com.cn

中图分类号: TG250.6  
文献标识码: A  
文章编号: 1001-4977(2020)05-0541-06

基金项目:  
云南省教育厅科学研究基金(2019J0448)。  
收稿日期:  
2019-09-20 收到初稿,  
2019-11-22 收到修订稿。

式中： $\rho$ 、 $\lambda$ 、 $C_p$ 分别为材料的密度、导热系数和比热容； $Q$ 为内热源。

求解Fourier导热微分方程的定解条件还包括初始条件和边界条件。其中，初始条件见式(2)。

$$T(x, y, z, t)|_{t=0}=T_0 \quad (2)$$

式中： $T_0$ 为初始温度。

第三类边界条件见式(3)。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_s = h(T_1 - T_2) \quad (3)$$

式中： $T_1$ 和 $T_2$ 分别为铸件和铸型在界面接触处的温度， $h$ 为铸件与铸型间的界面换热系数。

金属凝固过程中释放结晶潜热是显著特点。公式1中的内热源 $Q$ 就是凝固过程释放的结晶潜热，其表达式为见式4。

$$Q = \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} = \rho L \frac{\partial f_s}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

式中： $L$ 为合金的结晶潜热； $f_s$ 为温度 $T$ 时的固相率，它是温度的函数。

将式4代入式1，则有：

$$\rho \left( c_p - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

综合以上，按正常的瞬态导热微分方程的处理方法，即可实现对该方程的数值求解，求得凝固过程铸件与铸型内的瞬态温度场<sup>[2]</sup>。

## 2 铸造凝固过程数值模拟关键技术及影响因素

### 2.1 铸造凝固过程数值模拟边界条件的确定

在铸件-铸型-环境热交换系统中通常存在以下四种类型的边界条件<sup>[3]</sup>：

对流边界条件：

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_f) = 0 \quad (6)$$

常温边界条件：

$$T(x, y, z, t) = T_0 \quad (7)$$

绝热边界条件：

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (8)$$

辐射边界条件：

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + s\sigma(T^4 - T_f^4) = 0 \quad (9)$$

### 2.2 潜热的处理

铸件在凝固过程中会释放出大量的潜热。铸件向铸型所传递的热量中，金属过热的热量仅占20%左右，凝固潜热约占80%，因此潜热释放对于铸件凝固过程具

有重大影响。准确反映潜热释放规律，对于正确计算铸件的温度分布是十分重要的。可采用两种方法处理结晶潜热问题。对没有共晶反应发生的铸件，采用等效比热法(式10)。

$$C_E = C_p - L \frac{\partial f_m}{\partial T} \quad (10)$$

式中： $C_E$ 为等效比热； $f_m$ 为固相率； $T$ 为温度； $L$ 为潜热。固相率与温度的函数关系可以通过相图得到，也可以假设固相率呈线性分布或呈二次分布计算得到。

对有共晶反应发生的铸件，则采用等效比热法和温度回升法相结合的方法(式11)，这种方法可以避免由于温度下降幅度过大跨过共晶反应温度而造成计算误差。

$$\Delta f_m = C_p \cdot \Delta T / L \quad (11)$$

式中： $C_p$ 为材料比热容； $\Delta T$ 为温度降低量。

即采用固相率的增加来代替潜热的放出。如果固相率为1( $\sum \Delta f_m = 1$ )，则假定领域 $V$ 的凝固结束。在用温度回升法时，固相率增量有一基值，即 $\Delta f_m = f_0$ ， $f_0$ 可根据相图求出。这种方法即可以缩短计算时间，又可以比较正确地反映共晶反应潜热释放的特点<sup>[4]</sup>。

### 2.3 材料热物性值变化的处理

金属材料的热物性(比热、密度、导热系数等)一般均随温度而变化。当温度变化不大时，可采用材料热物性的平均值计算。若温度变化剧烈，又不考虑材料热物性随温度的变化，计算结果与实际情况就会产生很大偏差。铸件在凝固过程中温度变化很大，材料的热物性是温度的函数，热传导方程为非线性方程。

在计算时，考虑了材料热物性随温度的变化，将材料热物性表示成温度的函数(式12)。

$$G = a + bT + cT^2 \quad (12)$$

式中： $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为常系数，可查手册获得。

在采用三水平时间步格式求解方程时，利用方程第二步求得温度值，计算出依赖于温度变化的热物性值，并把它作为第三步求解时材料热物性的近似值。考虑到金属和合金的热物性随温度变化的关系比较复杂和限制，还可采用分段等值法处理材料热物性问题<sup>[5]</sup>。

## 3 铸造凝固过程数值模拟计算模型

在铸造宏观凝固过程的数值模拟研究中，常作出如下的假设或简化：铸型瞬时充满，在充型过程中无热交换作用，液体金属的初始温度即为浇注温度。液体金属内部无对流作用，亦即无能量与质量的传输。液、固态金属的热物性均为常数，即不随温度而

变,且常取相同数值。铸型材料的热物性值亦常取为常数。常不考虑气泡的存在,或即使存在,但仅以一简化的综合换热系数来描述而忽略其间复杂的传热过程。在上述假设下,考虑凝固潜热效应的热传导方程见式13。

$$\rho(c - L \frac{\partial f_s}{\partial T}) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (13)$$

固相率与温度的关系采用scheil表达式(式14)。

$$f_s = 1 - \left( \frac{T_0 - T}{T_0 - T_L} \right)^{\frac{1}{1-k_0}} \quad (14)$$

式中:  $f_s$  为质量固相率;  $k_0$  为平衡分配系数;  $T_0$  为纯溶剂组元的熔点;  $T_L$  为液相线温度;  $L$  为凝固潜热;  $c$  为材料热容。

在实现温度与固相率模拟的基础上,采用普遍应用的Niyama函数进行铸件缺陷的判断。此法认为补缩过程与补缩方向上的固相率梯度和凝固速度直接有关,并定义预测收缩缺陷的参数  $P$  见式15。

$$P = \left( \sum_n G_{fs} / \sqrt{R_\theta} \right)_{fsc} \quad (15)$$

式中:  $G_{fs}$  为计算单元可补缩方向的固相率梯度;  $R_\theta$  为计算单元的凝固速度(单位时间内固相率的增量);  $n$  为计算单元可补缩方向的数量。下标  $fsc$  指此项计算在该单元达到临界固相率时进行<sup>[6]</sup>。

### 4 基于FEPG平台的铸造凝固过程数值模拟软件研发

FEPG采用元件化程序设计方法和程序自动生成技术,根据核心算法和公式理论进行系统编程,其基本思路为:PDE表达式+算法生成计算程序,具体流程见图1。利用PDE有限元弱形式文件及算法文件生成计算程序高级语言代码,应用前、后处理进行仿真模拟。通过使用公式库生成程序,应用公式库菜单生成所需有限元计算程序。根据研究问题,用有限元语言将控制方程编写为VDE、PDE文件,将计算方法写成gcn和gio文件,然后用FEPG系统命令(Gio命令)生成有限元程序。通过图2所示流程实现有限元问题的求解。

凝固过程温度场数值模拟是铸造过程模拟核心内容之一,是预测缩孔、缩松、热裂和宏观偏析等铸造缺陷的基础。温度场数值模拟常用两种方法:有限元法和有限差分法,我们基于有限单元法进行铸造过程数值模拟的软件开发。模拟过程充分考虑材料和边界条件等模拟参数的非线性特征及结晶潜热。

所开发的铸造凝固过程数值模拟仿真软件SIMU-CAST主要功能有:铸件温度变化的热传导、对流换热计算;铸件温度变化的非线性辐射散热计算;相变

潜热释放对铸件温度变化的影响计算;固相率场的变化计算;用Niyama函数进行铸件缺陷的判断;前、后处理功能。包括自动可控的(三角形、四边形、四面体、六面体)网格的自动剖分;可视化结果输出:云图、等值线、等值面、向量图、流线、图表、切割图、动画等;可自动导入CAD的DXF、IGES、Parasolid、SAT、STL等文件格式;支持多种图形文件格式,如GIF、JPEG、BMP、EPS、PS等;有完备的材料热物性数据库,并具备材料热物性参数自定义功能。铸造过程温度场模拟计算流程见图3。

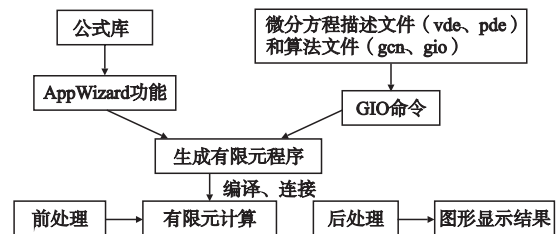


图1 应用FEPG进行有限元计算流程  
Fig. 1 Finite element calculation process based on FEPG

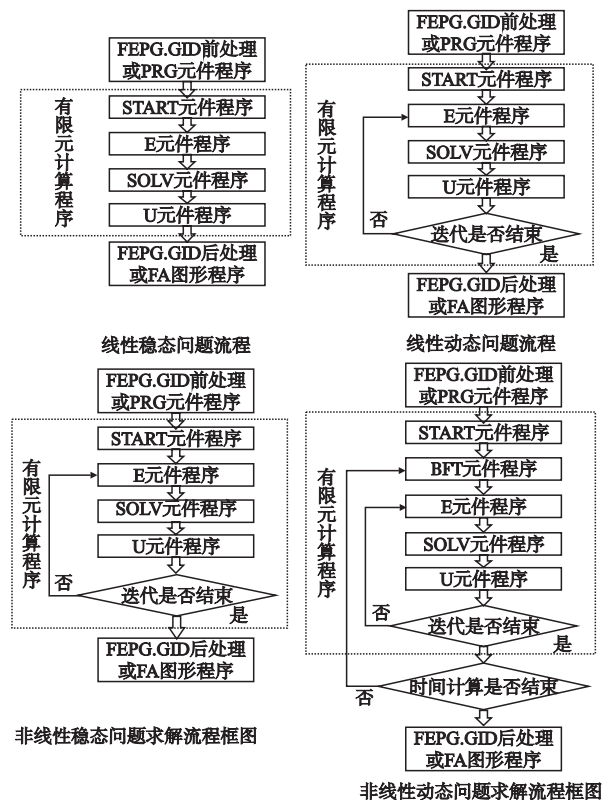


图2 求解流程及框图  
Fig. 2 Flow diagram of finite element calculation

## 5 开发软件SIMU-CAST的铸造过程数值模拟及模拟结果分析

### 5.1 二维模型的铸造过程数值模拟

二维模型铸件与铸型，其几何尺寸和边界条件如图4所示。铸型初始温度为室温，液态金属浇注温度为 1 540 ℃。模拟铸件凝固过程的温度和固相率变化。铸件的温度分布和固相率分布结果分别见图5、6。

### 5.2 三维模型的铸造过程数值模拟

#### 5.2.1 铸型: steel\_H13

成分: 质量分数C0.405%, Mn0.35%, Si1.0%, Cr5.125%, Mo1.425%, V1.0%, 其余为Fe。

密度: 7 367 kg/m<sup>3</sup>。

#### 5.2.2 铸件: AL\_Al95.5-Cu4.5

成分: 质量分数Al95.5%, Cu4.5%。

密度: 2 787 kg/m<sup>3</sup>。

液固相线: 637.85 ℃, 501.85 ℃。

### 5.3 SIMU-CAST 数值模拟计算结果与 ProCAST 计算结果对比

铸件完全凝固时铸件及铸型温度场分布对比见图7, 铸件固相率、凝固时间对比见图8、9。对比结果表明两种数值模拟软件计算结果的温度场分布趋势、铸件固相率分布及凝固时间基本一致。

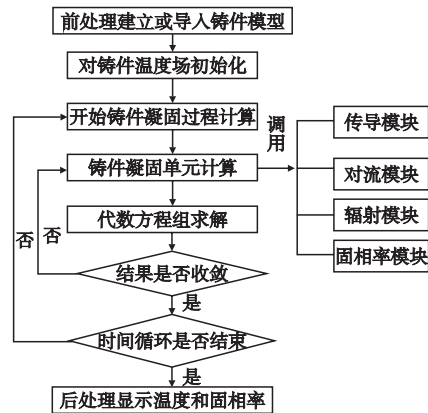


图3 铸造过程温度场模拟计算流程

Fig. 3 Simulation calculating flow chart of casting temperature field

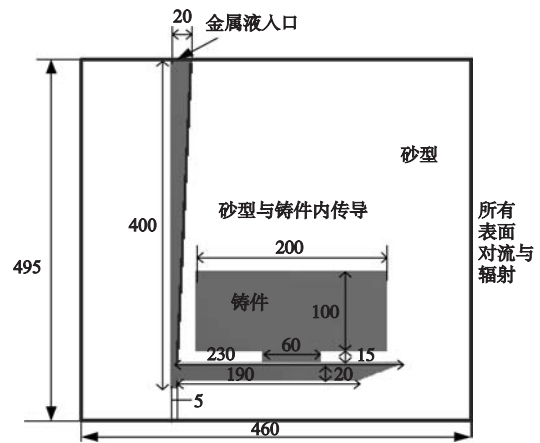


图4 二维模型铸件与铸型

Fig. 4 Casting and mould of two-dimensional model

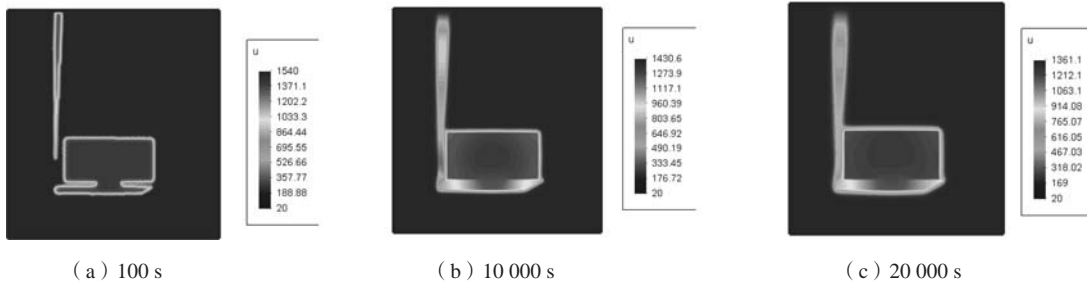


图5 铸造模拟凝固温度分布

Fig. 5 Temperature distribution during casting solidification

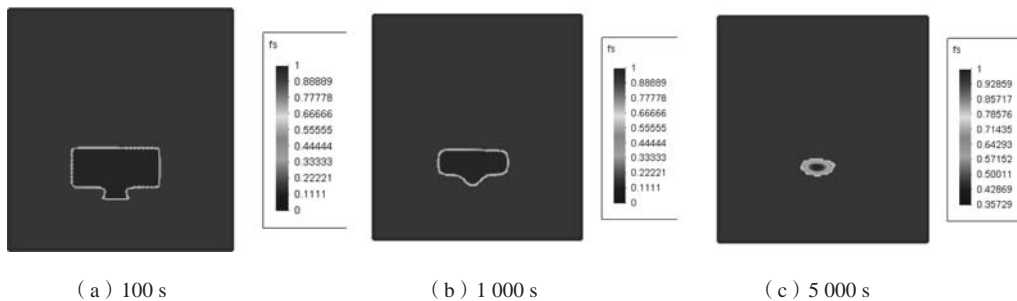


图6 铸造模拟凝固固相率分布

Fig. 6 Solid fraction distribution during casting solidification

### 5.4 模拟结果的温度趋势分析及试验验证

铸件凝固过程温度趋势分析见图10, 实际测量验证见图11。SIMU-CAST和ProCAST计算结果及试验验证结果证明, 所开发软件计算分析的吻合度较高, 仿

真计算的温度变化曲线与现场测试得到的温度变化曲线结果吻合度较好, 仿真计算温度变化情况与试验实测温度值之间误差较小, 计算精度较高。

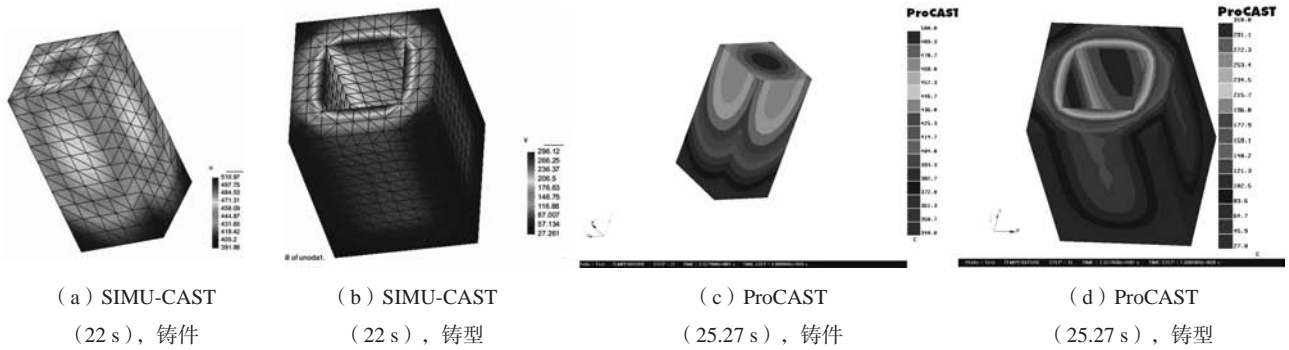


图7 使用SIMU-CAST及ProCAST软件模拟的铸件完全凝固时铸件及铸型温度场分布

Fig. 7 Comparison of casting and mould temperature distribution after casting solidification, simulated by SIMU-CAST and ProCAST, respectively

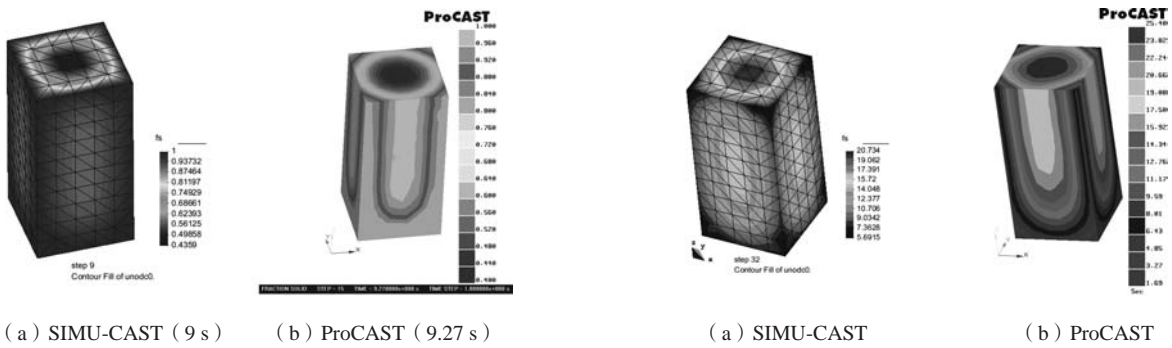


图8 铸件固相率分布对比

Fig. 8 Comparison of casting solid fraction

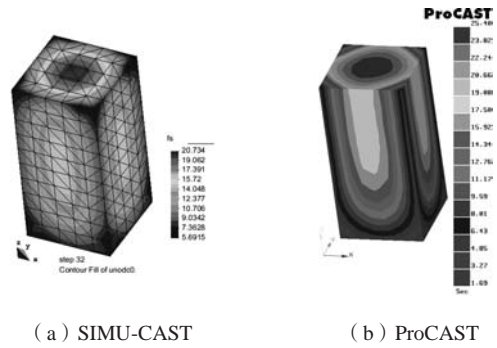


图9 铸件凝固时间对比

Fig. 9 Comparison of casting solidification time

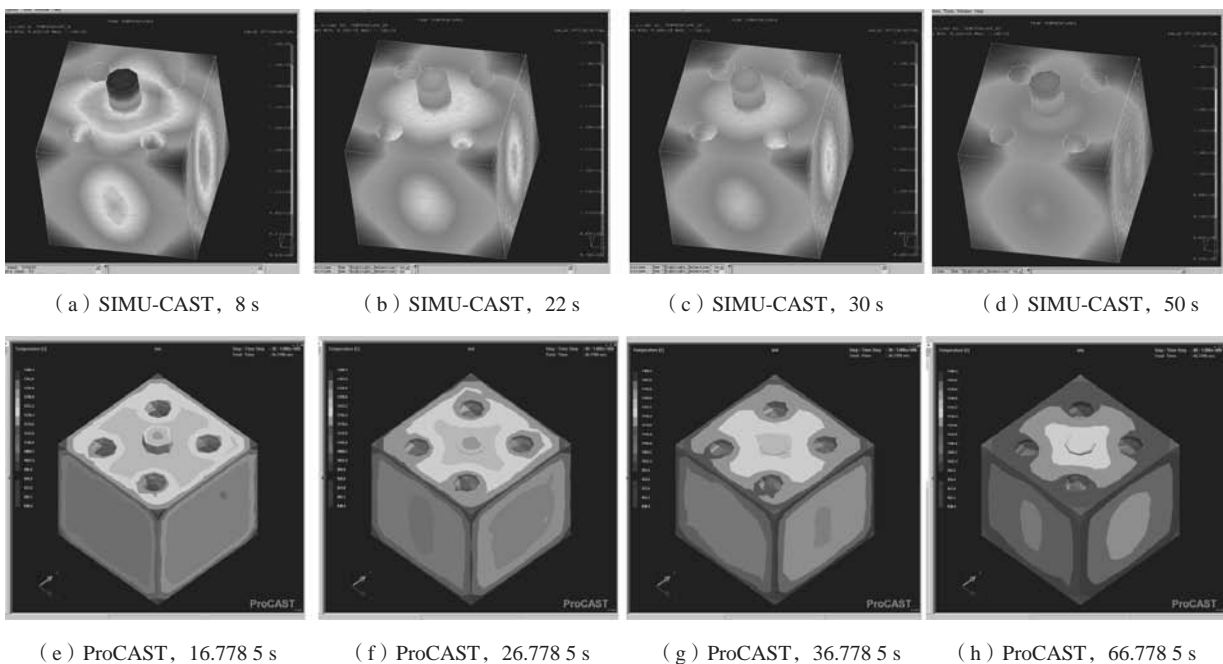


图10 铸件凝固过程温度变化

Fig. 10 Variation of temperature at different solidification times

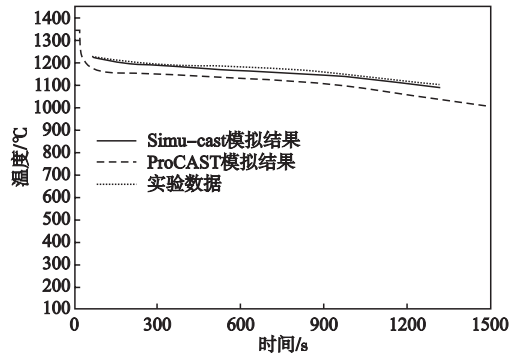


图11 铸件凝固过程同一测点温度对比

Fig. 11 Curves of change of temperature with time at one checkpoint during casting solidification

## 6 结束语

通过研发铸造过程有限元仿真软件SIMU-CAST,并将该软件铸件凝固过程计算结果及趋势与ProCAST铸造有限元分析软件计算结果及趋势相对比,通过在某铸造现场对铸件凝固过程温度变化情况进行试验,并将SIMU-CAST软件模拟计算的温度变化曲线与现场测试得到的温度变化曲线进行比对。结果表明,两种软件的温度场变化分析结果趋势基本一致,结果吻合度较好,模拟计算温度变化情况与实测温度值之间误差较小,计算精度较高,通过试验验证了软件模拟计算结果的准确性及计算精度,铸件缩孔缩松预测结果及位置基本准确。软件能满足工程实际应用的要求。软件技术的进一步推广应用可促进铸造企业采用先进的CAE技术改进生产工艺、优化铸造工艺设计、提高铸造质量、降低铸件废品率、提高铸件合格率。

### 参考文献:

- [1] 熊守美,许庆彦,康进武.铸造过程模拟仿真技术[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [2] 柳百成,荆涛.铸造工程的模拟仿真与质量控制[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [3] 陈海清.铸件凝固过程数值模拟[M].重庆:重庆大学出版社,1991.
- [4] 耿浩然,姜清河,李长龙,等.实用铸件重力成形技术[M].北京:化工工业出版社,2003.
- [5] 柳百成.铸件充型凝固过程国内外研究进展[J].铸造,1999(8):40-45.
- [6] 荆涛.凝固过程数值模拟[M].北京:电子工业出版社,2002.

## Development of Numerical Simulation Software for Casting Solidification Process Based on FEPG Platform

YANG Man-yun<sup>1,2</sup>

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, Yunnan, China; 2. Yunnan Vocational College of Mechanical & Electrical Technology, Kunming 650203, Yunnan, China)

### Abstract:

Numerical simulation software for casting solidification process was developed by using componentized programming designing method and code automatic generation technology based on FEPG development platform. The software has the function of numerical simulation for temperature field and solid fraction distribution during casting solidification and can predict casting defects based on FEM method. By comparing the analysis results with those of a similar analysis from the ProCAST software and the experimental measurement data, it was found that the accuracy and precision of results coincided with each other. The analysis results can satisfy the practical application.

### Key words:

FEPG platform; solidification process; numerical simulation