

基于有限元法的多材质铸造温度场模拟软件开发

曹流 廖敦明 周聪 陈涛 庞盛永 周建新
(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室)

摘要 以瞬态傅里叶导热微分方程为基础,提出了一种处理多材质铸造过程边界条件的通用化方法,自主开发了基于有限元法(FEM)的多材质铸造过程温度场数值模拟软件。计算了工字型件空冷过程温度场以及多材质复杂铝合金铸件凝固过程温度场,并与 ANSYS 以及华铸 CAE 的模拟结果进行了对比。对比结果表明,空冷过程的温度场的最大相对误差为 2.130%,凝固过程温度场的最大相对误差约为 2.064%,验证了温度场程序的正确性以及可靠性。

关键词 温度场;数值模拟;有限元法;边界处理

中图分类号 TP311

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2015.11.012

Self-development Casting Temperature-field Simulation Software for Multiply Materials Based on Finite Element Method

Cao Liu, Liao Dunming, Zhou Cong, Chen Tao, Pang Shengyong, Zhou Jianxin

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die

Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: Based on the mathematical model of the transient heat conduction equation, a general method of treating multi-material boundary conditions was presented, and a temperature-field numerical simulation program for multiply materials based on finite element method (FEM) was developed. The temperature field of a typical I-shaped specimen during air cooling and a complex aluminium alloy casting during solidification process were calculated by the self-developed program, which was well agreement with the ones calculated by ANSYS and InteCAST. The maximum relative error of temperature field during air cooling is 2.130%, and the maximum relative error during solidification is 2.064%, so the correctness and the reliability of the temperature program have been verified.

Key Words: Temperature Field, Numerical Simulation, FEM, Treating Boundary

随着计算机仿真技术的发展,模拟仿真技术作为工业生产中提高生产效率以及节约生产成本的有效手段,在实际工业生产中得到了越来越多的应用。铸造过程模拟仿真技术得到广泛应用,温度场模拟作为铸造模拟仿真技术的基础内容,可以预测铸造过程缩孔、缩松、宏观偏析等缺陷,以及热处理过程中相变组织的演变过程,并可用于辅助设计铸造工艺、提高生产效率和节约成本^[1~4]。与其他数值模拟方法相比,FEM在求解具有复杂的几何边界条件、几何形状和非线性问题上具有较大的优势^[5]。

对基于有限元法的空冷过程温度场数值模拟自主开发^[6]工作做了进一步研究。本课题以瞬态的傅里叶导热微分方程为基础,提出了一种处理多材质铸造过程边界条件的通用化方法,自主开发了基于 FEM 的多材

质铸造过程温度场数值模拟软件。通过计算典型工字形件空冷过程温度场以及多材质复杂铝合金铸件凝固过程温度场,并与 ANSYS 以及华铸 CAE 的模拟结果进行了对比,验证了温度场模拟程序的正确性以及可靠性。

1 瞬态温度场模拟数学模型

热传导方程是描述热传导过程的基本方程,它是由 Fourier 热传导定律和能量守恒定律推导而来。在一般三维问题中,瞬态温度场的场变量 $T(x, y, z, t)$ 在直角坐标中应满足微分方程及边界条件^[7]。

瞬态温度场的场函数温度不仅是空间域 Ω 的函数,也是时间域 t 的函数。由于这两种域并不耦合,因此建立有限元格式时可以采用部分离散的方法。首先

收稿日期:2015-04-28;修改稿收到日期:2015-05-28

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-13-0229, NCET-09-0396);国家数控重大专项资助项目(2012ZX04010-031, 2012ZX0412-011);国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013031003)

第一作者简介:曹流,男,1991年出生,硕士研究生,华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室,武汉(430074),电话:18271398959, E-mail: caoliu@hust.edu.cn

通信作者:廖敦明,男,1973年出生,教授,华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室,武汉(430074),电话:027-87541922, E-mail: liaodunming@hust.edu.cn

将空间域 Ω 离散为有限个单元体,在典型单元内温度 T 仍可以近似地用节点温度 T_i 插值得到,但注意此时的节点温度是时间的函数,即:

$$T = \hat{T} = \sum_{i=1}^{n_e} N_i(x, y, z, t) T_i(t) \quad (1)$$

式中, n_e 为典型单元的节点个数; $N_i(x, y, z, t)$ 为插值函数,其只是空间域的函数。

采用加权余量法建立有限元格式,用伽辽金法选择权函数,得到三维瞬态导热传导问题的有限元求解方程^[7]为:

$$C\dot{T} + KT_1 = P \quad (2)$$

式中, C 为热容矩阵; K 为热传导矩阵; P 为温度载荷列阵; T_1 为节点温度列阵; \dot{T} 为节点温度对时间的导数列阵。 C 和 K (在引入给定温度条件之后) 都是对称正定矩阵。

式(2)有直接积分法和模态叠加法两种解法^[7]。采用直接积分法可在单步和多步中进行时间域离散,应用其两点循环公式,可得各个时刻温度场的迭代算法表达式:

$$\bar{K}T_{n+1} = \bar{Q}_{n+1} \quad (3)$$

其中

$$\bar{K} = C/\Delta t + \theta K \quad (4)$$

$$\bar{Q}_{n+1} = [C/\Delta t - (1 - \theta)K]T_n + (1 - \theta)P_n + \theta P_{n+1} \quad (5)$$

式中, \bar{K} 为系统有效系数矩阵; \bar{Q}_{n+1} 为系统有效载荷向量; T_n 与 T_{n+1} 分别为上一时刻和当前时刻的温度值向量; P_n 和 P_{n+1} 分别为上一时刻和当前时刻的载荷向量; Δt 为选取的时间步长; θ 为设置的差分格式参数,取值在 $0 \sim 1$ 之间。根据 θ 的不同取值,可以得到不同的积分方案,选取 $\theta = 2/3$ 的伽辽金差分格式来进行温度场计算。利用式(3),从时刻出发,根据给定的初始温度分布,可以依次递推求得各个时刻的温度场分布。

2 边界处理及温度场程序的实现

2.1 前处理网格剖分

在获得各部件的几何模型之后,需要对导入的几何体进行网格划分,即数值模拟的前处理,划分得到的有限元网格质量会影响后续的有限元数值计算的成功与否^[8]。为了保证获得的网格质量较好,采用 HyperMesh 软件进行网格划分。网格划分完成之后导出网格文件,所开发的温度场程序中设置相应的网格文件读取接口,程序中可读取四面体一次实体单元以及四面体二次实体单元。

2.2 边界处理

实际铸件凝固过程中,存在铸件与铸型、铸型与空气、铸件与空气、铸件与砂芯、铸型与砂芯、铸件与冷铁

以及铸型与冷铁等传热接触关系。而且随着材质以及铸造工艺复杂程度的增加,传热接触关系会更为复杂,因此,如何合理地处理各个传热边界十分关键。

在铸件凝固温度场数值模拟中,如果不考虑辐射传热边界,可以认为所有的传热边界均为对流传热边界,对流传热边界条件的微分方程见文献^[7],因此需要知道各个传热边界的界面传热系数以及外界环境温度。各个材质相互之间的界面传热系数作为热物性参数在模拟计算之前设置,而外界环境温度在迭代计算过程中是不断变化的,所以如何获得各个传热边界的外界环境温度是处理对流传热边界的重点。

传热边界的处理实际上是对各材质的表面单元进行操作。对四面体单元而言,就是对各材质的表面三角形单元进行处理。在处理对流传热边界时,采用六节点五面体进行链接,见图 1^[9]。这种单元是一类特殊单元,它没有质量,没有厚度,是为计算边界热传递而建立的,其中 a 和 a' 、 b 和 b' 、 c 和 c' 的坐标相同^[10]。所需的外界环境温度即为对应表面单元的温度。虽然此方法能够准确地处理对流传热边界,但是要求整体有限元网格为共节点网格,对前处理网格划分提出了较高的要求,而且该方法无法处理非共节点网格边界,因此需要一种通用化的边界处理方法,能够对共节点和非共节点边界均进行有效处理。

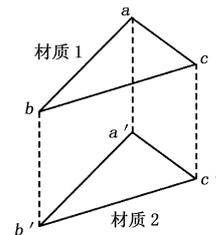


图 1 采用六节点五面体处理对流传热边界

对于单个表面节点而言,其对流传热边界所需的外界环境温度即为相邻材质在该节点处的温度。本课题所提出的通用化边界处理方法为:针对材质 1 的单个表面节点 a ,找出相邻材质即材质 2 表面节点中与节点 a 相隔最近的两个节点 a' 和 b' ,并求出节点 a 与节点 a' 、节点 b' 的距离值 $L_{aa'}$ 、 $L_{ab'}$,边界处理见图 2,则迭代计算中节点 a 的外部环境温度 T_a 为:

$$T_a = \frac{L_{ab'}}{L_{aa'} + L_{ab'}} T_{a'} + \frac{L_{aa'}}{L_{aa'} + L_{ab'}} T_{b'} \quad (6)$$

式中, $T_{a'}$ 和 $T_{b'}$ 分别为节点 a' 和 b' 在迭代计算中的温度值。

另外,需要说明:①当 $L_{ab'}/(L_{aa'} + L_{ab'}) < 10^{-6}$ 时,认为 $T_a = T_{b'}$,其他情况同理;②铸型与空气相接触表面以及铸件与空气相接触表面的对流传热边界中外界环境温度认为是常数,所以需要将铸型与空气相接触的表面单元和浇注入口表面单元提取出来,以单独处理;

③当材质数目为3或者更多时,为了更为方便地组装对流载荷向量,查找出来的相邻两个节点 a' 和 b' 应为同一材质;④组装表面单元的对流传热矩阵时,所需对流传热系数值取此表面单元3个节点的对流传热系数值的平均值。

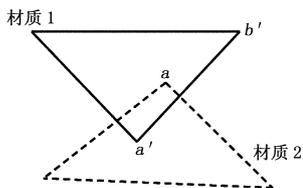


图2 所提出的通用化边界处理方法示意图

2.3 温度场程序的实现

基于上述的瞬态温度场理论和传热边界处理方法,本课题开发了多材质铸造过程有限元温度场数值模拟程序。瞬态温度场的求解除了基本的数学模型之外,还需要给定初始条件以及边界条件。由于温度场数值模拟程序往往需要比较多的迭代计算步数,所以温度场程序中含有续算功能。多材质温度场程序的计算流程为:①首先判断是否续算,如果判断结果为 No,则读取各材质网格文件,如果判断结果为 Yes,则读取节点续算温度;②组装各材质刚度矩阵和热容矩阵、查找边界信息、组装各材质对流传热矩阵和对流传热向量;③迭代计算温度场并保存结果,直至计算结束。

3 程序计算结果的检验

3.1 典型工字件空冷过程温度场计算

3.1.1 典型工字件模型及参数设置

为了验证有限元温度场程序的准确性,通过计算典型工字件(45号钢)空冷过程温度场,与大型通用型有限元分析软件 ANSYS 模拟结果对比分析。工字件几何模型见图 3a,初始温度为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$,空气温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,工字件与空气间的对流传热系数为 $50\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。工字件的热导率 $k=60\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;密度 $\rho=7\ 800\text{ kg}/\text{m}^3$;比热容 $c=0.607\text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ 。网格剖分结果见图 3b,采用四面体一次单元,节点总数为 2 240,单元总数为 8 570,时间步长取 $t=1\text{ s}$ 。

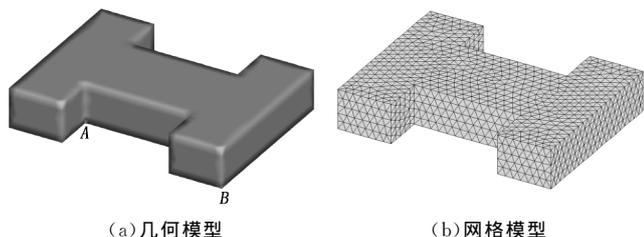


图3 典型工字件模型

3.1.2 对比分析 ANSYS 模拟结果

根据上述的典型工字件模型,分别采用自主开发的

有限元温度场程序和 ANSYS 计算其空冷过程温度场。选取工字件中两个特殊点 A 点和 B 点,见图 3a,将程序中计算的 A 点和 B 点各时刻温度与 ANSYS 计算的结果相对比,对比结果见表 1。

表1 程序与 ANSYS 所计算的 A、B 点各时刻温度对比

时间/s	A 点温度/ $^{\circ}\text{C}$			B 点温度/ $^{\circ}\text{C}$		
	程序	ANSYS	相对误差/ $\%$	程序	ANSYS	相对误差/ $\%$
10	487.563	488.140	1.182	481.922	482.650	1.511
20	476.745	477.300	1.163	469.914	470.610	1.482
40	455.845	456.350	1.106	448.456	449.100	1.437
60	435.933	436.420	1.117	428.647	429.260	1.429
80	416.954	417.430	1.140	409.939	410.530	1.443
100	398.864	399.330	1.167	392.155	392.730	1.465
200	320.337	320.770	1.351	315.049	315.560	1.621
400	209.877	210.220	1.634	206.601	206.990	1.884
600	141.442	141.700	1.824	139.412	139.700	2.065
800	99.043	99.233	1.915	97.786	97.994	2.130
1 000	72.775	72.911	1.862	71.996	72.143	2.038
1 200	56.501	56.597	1.693	56.019	56.121	1.829

从表 1 中的对比结果来看,程序与 ANSYS 所计算的 A、B 点温度的最大相对误差为 2.130% 。从数值模拟的角度来看,程序与 ANSYS 的计算结果差别不大。而两者之间的误差主要来自于两方面:一方面是所采用的网格模型不同;另一方面是有限元法作为一种数值模拟方法,其本身就是一种近似解法,在有限元计算过程中不同的处理所带来的解的波动是正常现象。

3.2 多材质复杂铝合金铸件凝固过程温度场计算

3.2.1 铝合金铸件模型及参数设置

为了验证温度场程序处理边界的准确性,通过计算铝合金铸件凝固过程温度场,并与华铸 CAE 模拟结果进行对比。各部件几何模型与网格模型见图 4。采用四面体二次单元进行网格划分,得到的整体节点数为 139 879,整体单元数为 87 170,时间步长取 $t=1\text{ s}$ 。

材质采用 ZL114A,铸型以及砂芯采用树脂砂,铸件及铸型的热物性参数见表 2。另外铸型与空气以及

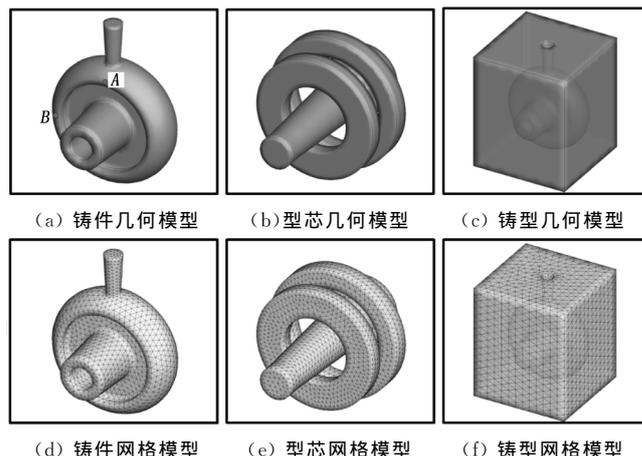


图4 几何模型及网格模型

铸件与空气的传热系数为 $300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 空气温度设为恒温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 铸件与铸型的传热系数为 $800 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 合金潜热为 $418 \text{ J}/\text{g}$, 合金液、固相线温度分别为 $615 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $555 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

表 2 铸件、铸型及砂芯的热物性参数

	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	初始 温度/ $^\circ\text{C}$
铸件	152	2 500	963	700
铸型及砂芯	1.135	1 650	1675	20

3.2.2 对比分析华铸 CAE 模拟结果

根据上述的铝合金铸件模型及各材质物性参数, 采用自主开发的有限元温度场程序计算其凝固过程, 同时采用华铸 CAE 进行同样模型的温度场模拟。选取铸件上的两个特殊点 A 点和 B 点, 见图 4。将程序中计算的 A 点和 B 点各时刻温度与华铸 CAE 的计算结果相对比, 对比结果见图 5。

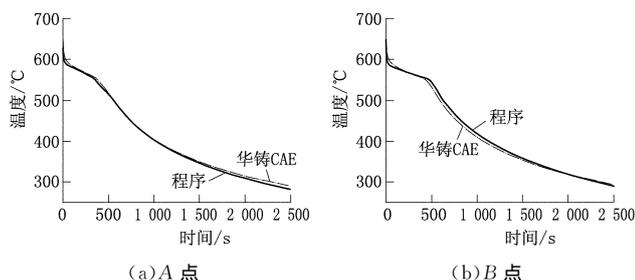


图 5 程序与华铸 CAE 所计算的 A、B 点各时刻温度对比

从图 5 可以看出, A 点和 B 点在程序及华铸 CAE 计算结果中的温度变化基本一致, 其中 A 点的最大相对误差为 1.266% , B 点的最大相对误差为 2.064% , 误差均在可接受范围之内。从 A 点和 B 点的降温曲线可以看出, 由于铸件在凝固过程中潜热的释放, 降温速率会出现明显的变化。

在空冷过程温度场算例中, 温度场程序与 ANSYS 的最大相对误差为 2.130% , 相比而言, 在多材质凝固过程温度场算例中, 温度场程序与华铸 CAE 的最大相对误差为 2.064% 。对处理多材质时的误差来源进行分析, 其原因主要是处理边界的方法不同, 因此, 提出了一种通用化的边界处理方式, 对边界处理进行了一定的简化, 在一定程度上会对计算结果的精度有影响。从多材质算例的计算结果来看, 所提出的通用化边界处理方法是合理的。

选取温度场程序计算结果中 6 个时刻的铸件温度场分布, 见图 6, 后处理采用专业后处理软件 Tecplot。从图 6 可以看出, 由于浇注入口表面与空气接触, 故浇注入口降温较快, 而铸件前端凸出部分壁厚较薄且周围由铸型和砂芯围绕, 故铸件前端降温也较快; 由于浇注入口降温较快, 使得铸件下端相比铸件上端而言降温较慢; 由于铸件为对称结构, 故温度分布也为对称分布。

因此, 温度场程序的模拟结果与实际温度场的分布规律是符合的。

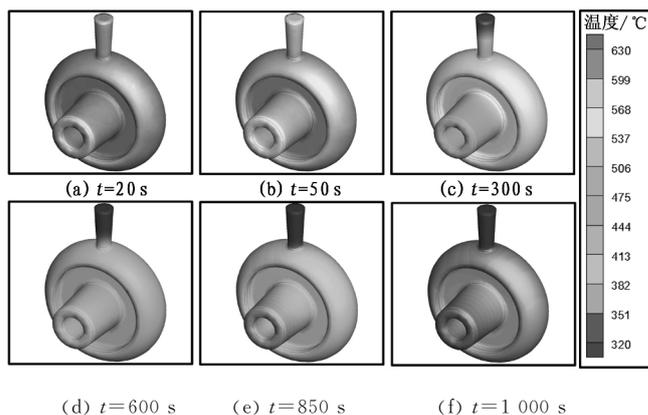


图 6 温度场程序计算结果中 6 个时刻的铸件温度场分布

4 结 语

以瞬态傅里叶导热微分方程为基础, 自主开发了基于有限元法的多材质铸造过程温度场数值模拟软件, 提出了一种处理多材质铸造过程边界条件的通用化方法。通过计算典型工字件空冷过程温度场以及多材质复杂铝合金铸件凝固过程温度场, 并与 ANSYS 以及华铸 CAE 的模拟结果进行了对比。对比结果表明, 空冷过程温度场的最大相对误差为 2.130% , 凝固过程温度场的最大相对误差为 2.064% , 验证了温度场程序的正确性以及可靠性。

参 考 文 献

- [1] 柳百成. 铸造技术与计算机模拟发展趋势[J]. 铸造技术, 2005, 26(7): 611-617.
- [2] 周建新. 铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势[J]. 铸造, 2013, 61(10): 1 105-1 115.
- [3] 王志坚, 赵岩, 宋鸿武, 等. 大型铝合金轮毂低压铸造过程数值模拟及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(3): 256-259.
- [4] 杨明华, 游国强, 陈磊. 基于数值模拟的镁合金压铸件工艺设计及优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(6): 519-522.
- [5] 廖敦明, 向智, 陈立亮, 等. 基于 MATLAB 平台有限单元法的铸造热应力数值模拟[J]. 铸造, 2011, 60(6): 554-558.
- [6] 周聪, 廖敦明, 陈涛, 等. 基于有限元法的空冷过程温度场数值计算及程序开发[J]. 铸造, 2013, 62(9): 850-854.
- [7] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [8] 陈涛. 基于有限元法的铸造热应力数值模拟及其智能化技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [9] HUANG H, GURDOGAN O, AKAY H U, et al. Thermal transport phenomena in metalcasting simulations (95-95)[J]. Transactions of the American Foundrymen's Society, 1995, 103: 243-252.
- [10] 周超. 复杂铸件凝固过程面向对象的有限元数值模拟[D]. 福州: 福州大学, 2003.

(编辑: 袁振国)