

消失模铸造充型过程的模拟方法*

李锋军 沈厚发 柳百成

(清华大学机械工程系, 北京 100084)

摘要 通过分析消失模铸造充型过程的特点, 提出了一种消失模铸造充型过程的计算模型, 并用神经网络算法计算了充型过程中不同时刻液态金属-模样界面的位置. 模拟计算结果与实际测试结果无论在充型形态还是充型时间上都符合得较好.

关键词 消失模铸造, 充型, 神经网络, 数值模拟

中图分类号 TG249.6, TG244.1 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2003)07-0686-05

AN APPROACH FOR MOLD FILLING SIMULATION IN LOST FOAM CASTING

LI Fengjun, SHEN Houfa, LIU Baicheng

Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

Correspondent: LI Fengjun, Tel: (010)62789922, E-mail: lijf@263.net

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 59990470-3) and National Key Basic Research and Development Programme of China (No. G2000067208-3)

Manuscript received 2002-09-14, in revised form 2002-12-17

ABSTRACT An approach of modeling on the mold filling process for lost foam casting (LFC) was proposed according to the characteristics of LFC. Artificial neural network technique was applied to calculate the locations of metal front at time intervals. The results of simulations and experiments are consistent, both in filling pattern and sequence.

KEY WORDS lost foam casting, mold filling, artificial neural network, numerical simulation

近年来, 随着各种精确成形技术的开发及应用, 精确成形过程的模拟仿真逐渐成为技术研究的热点. 干砂消失模铸造工艺是 20 世纪 80 年代末开始投入工业应用, 并逐步得以发展完善的铸造新技术. 由于其诸多优点, 被认为是一项很有发展前景的近净形加工技术和清洁生产技术. 与普通的空腔铸造相比, 影响消失模铸造充型过程的因素较多也更复杂, 铸造缺陷大多产生在充型过程中. 铸件在大量生产之前往往需要通过浇注实验来确定其铸造工艺, 造成许多经济上和时间的损失. 因此, 消失模铸造充型过程模拟仿真的工程意义尤为重要.

消失模铸造的充型速度主要受模样的分解及气化产物排出的制约, 而不像空腔铸造主要取决于重力的作用. 因此, 消失模铸造的充型过程如果像空腔铸造那样依靠流体动力学的方法来计算, 必须做特殊假设. 目前, 消失模铸造充型过程模拟仿真完善的计算模型较少. 已有的研究

工作主要基于 SOLA-VOF 算法, 通过设置特殊的边界条件对充型过程进行模拟计算^[1-3].

本文对消失模充型过程中的界面推移情况进行了分析, 在此基础上提出了一种充型过程模拟的新方法.

1 问题的简化

消失模铸造充型过程中, 液态金属与模样间存在着复杂的物理、化学作用. 模样在液态金属的热作用下迅速分解, 产生大量气体, 从而在液态金属与模样之间形成气隙. 气隙中充满了泡沫塑料的热解产物, 并产生较大的压力. 与普通的空腔铸造相比, 这种压力作用会大大降低充型速度, 同时也使其充型形态与空腔铸造有显著不同. 液态金属前沿的速度取决于消失模模样消失的速度, 而模样消失的速度与真空度、模样密度、浇注温度和金属压头等工艺因素有关, 重力对充型形态和充型速度的影响相对较小.

由于上述消失模铸造充型过程的复杂性, 其数学描述十分困难, 目前还不能建立比较完善的模型对消失模充型过程进行精确的计算. 文献报道的简化方法有: 设置界面前沿速度^[1]、设置界面前沿压力^[2]、限制内浇口尺寸^[3]等. 为了使模拟比较符合实际, 本文根据有关文献报道及

* 国家自然科学基金重大项目 59990470-3 和国家重点基础研究规划项目 G2000067208-3 资助

收到初稿日期: 2002-09-14, 收到修改稿日期: 2002-12-17

作者简介: 李锋军, 男, 1966 年生, 博士生

实际测试结果,对消失模充型过程进行以下简化:

(1) 假设模样的消失过程主要受液态金属热作用的影响,液态金属-模样界面呈放射状向前推移.并假设这种界面推移过程只受真空度、模样密度、浇注温度和金属压头的影响.这一假设主要基于实验测试结果^[4-6],并考虑了主要影响因素,从而简化计算.

(2) 假设内浇口的尺寸足够大,可满足足够的液态金属流量.在普通的空腔铸造过程中,内浇口尺寸对充型速度及液态金属的流动形态有很大影响.对于封闭式浇注系统,内浇口为阻流环节.但在消失模铸造过程中,内浇口往往能够提供足量的液态金属来补充因界面推移而需要的金属流量,一般情况下不能成为阻流环节;只有当内浇口尺寸足够小的时候,内浇口中的金属流量不能补充因模样消失而需要的金属流量,这时内浇口尺寸才成为阻流因素.而这种内浇口一般没有实际应用价值^[7].

(3) 假设直浇道能够提供足够的液态金属流量.这一假设主要针对如下情况:由于因界面推移而需要的液态金属量是瞬时变化的,为保证直浇道的充满,要求直浇道中液态金属的流量不断随需要量而改变(在空腔铸造模拟计算时,一般假设直浇道的流速恒定).这种改变是靠调整浇包中液态金属向浇口杯中的流量来保证的.

2 充型过程的计算模型

2.1 铸件的空间离散

将整个铸件(铸件本体及浇冒口系统)所占据的实体空间离散为适当尺寸的小立方体,每个立方体称为一个单元,如图 1 所示.

每个单元在充型过程中有 3 种状态:

- (1) 完全被液态金属占据(充满单元);
- (2) 完全被泡沫塑料模样占据(空单元);
- (3) 部分被液态金属占据,其余被泡沫塑料模样占据(界面单元).充满单元以特定的速度向周围的相邻空单元充填.

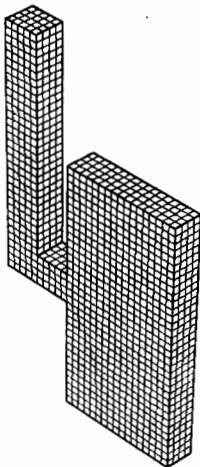


图 1 充型模拟时的铸件离散

Fig.1 Dissected casting for mold filling simulation

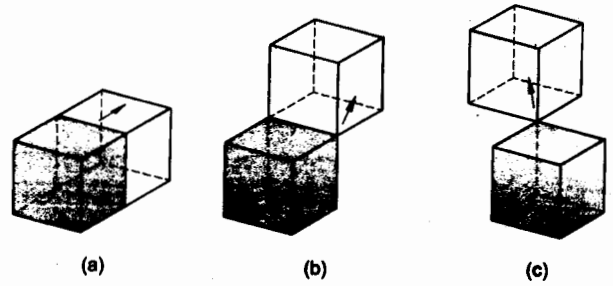


图 2 相邻单元的 3 种位置关系

Fig.2 Three orientations of neighboring cells

(a) type I (b) type II (c) type III

图 2 所示 3 类位置关系均视为相邻单元,图中阴影部分为充满单元.

图 2 同时显示了相邻单元间充型界面的推移方向.充满单元与空单元的相对位置不同,充填方向也不同:情况 I(图 2a),液态金属将沿图中所示的棱边方向充填,当充填距离超过立方体单元的边长 L 时,该相邻单元充满;情况 II(图 2b),液态金属将沿面对角线方向充填,充填距离超过 $\sqrt{2} \times L$ 时,相邻单元充满;情况 III(图 2c),液态金属将沿体对角线方向充填,充填距离超过 $\sqrt{3} \times L$ 时,相邻单元充满.每个单元最多有 26 个相邻单元(I 类 6 个, II 类 12 个, III 类 8 个).

对铸铁件消失模铸造而言,液态金属充型速度(即充满单元向其相邻空单元的推移速度)采用下式计算^[6]

$$u_{i,j,k} = \beta \times (-187.9967 + 815.16 \times 10^{-3} \times h - 123.98199 \times p - 792.04 \times 10^{-3} \times \rho + 304.4647 \times 10^{-3} \times \theta - 110.001 \times 10^{-6} \times \theta^2) \quad (1)$$

式中, $u_{i,j,k}$ 为计算点的充型速度, cm/s; h 为金属压头高度, cm; p 为真空度,即铸型中的气体压力, MPa; ρ 为模样密度, kg/m^3 ; θ 为浇注温度, $^{\circ}\text{C}$; $\beta = 0.8-1.1$, 由涂料性能及综合铸造条件而定.

该离散模型处理充型过程界面推移的步骤为:计算开始时,液态金属从直浇道顶端注入.即将图 1 中第一层立方体单元设置为充满单元,从而确定离散模型计算的初始条件(若为空心直浇道,则将直浇道到内浇口之间的单元设置为充满单元).随后给定一适当的时间步长,按照图 2 所示的 3 种位置关系和式(1)计算出铁水向相邻空单元推移的距离.经过若干时间步长后,当某一方向上的累计推移距离超过设定的特征长度(图 2 中情况 I 的特征长度为立方体的棱边长度 L ;情况 II 的特征长度为 $\sqrt{2} \times L$;情况 III 的特征长度为 $\sqrt{3} \times L$)时,该相邻单元变为充满单元.充满单元又向其相邻单元进行充填,直至所有单元均成为充满单元,则计算结束.

2.2 单元间相互作用的处理

采用人工神经网络算法处理上述离散模型中相连单元充型时的相互作用,从而求解消失模铸造的充型过程.

将离散化的铸件小立方体视为基本神经元. 所有神经元以一定的方式连接,组成神经网络系统. 神经元的连接方式为:每个神经元仅与其周围相邻的神经元相连,而与其它神经元不相连. 图 2 所示的 3 种相对位置关系均视为相邻神经元. 这种连接方式与细胞自动机的连接方式类似,是一种局部连接的、权值可设置的人工神经网络. 按照此连接方式,除了位于铸件边缘的神经元外,每个神经元都有 26 个相邻神经元. 用 $C(i, j, k)$ 表示一个神经元,用 $N(i, j, k)$ 表示与 $C(i, j, k)$ 神经元相连的神经元的集合,则

$$N(i, j, k) = \{C(l, m, n) | \max(|l - i|, |m - j|, |n - k|) = 1\}$$

上述模型是一种考虑时间特性的神经元模型. 构成网络的所有神经元,从初始时刻 t_0 开始,每隔 Δt 时间,依据活化函数同时改变状态,输出为 1 或 0. 对于任一时间间隔 $t \sim (t + \Delta t)$,任一神经元 $C(i, j, k)$ 都接受其 26 个相连神经元的输出信号作为其输入,记为 $\vec{b}_{i,j,k}$,则 $\vec{b}_{i,j,k}$ 为一 26 维向量,其各分量

$$b(i, j, k; l, m, n) = \Delta t \times r_{l,m,n} \quad C(l, m, n) \in N(i, j, k) \quad (2)$$

式中, $r_{l,m,n}$ 为神经元 $C(l, m, n)$ 的输出. 由后面的式 (5) 给出; $\Delta t \times r_{l,m,n}$ 的物理意义为:假设 $C(i, j, k)$ 为一非充满单元,则 $\Delta t \times r_{l,m,n}$ 为神经元 $C(l, m, n)$ 对 $C(i, j, k)$ 在相应方向上以单位速度在 Δt 时间内的推移距离.

神经元的总输入

$$P_{i,j,k} = f_{i,j,k}(\vec{\omega}_{i,j,k} \vec{b}_{i,j,k}) \quad (3)$$

式中, $f_{i,j,k}$ 为输入函数; $\vec{\omega}_{i,j,k}$ 为 26 维的权向量,其各分量 $\omega(i, j, k; l, m, n)$ 由相连单元的瞬时速度和相对位置而设定. 其具体设定方法为

$$\omega(i, j, k; l, m, n) = \begin{cases} u_{l,m,n} & (\text{type I in Fig.2a}) \\ u_{l,m,n}/\sqrt{2} & (\text{type II in Fig.2b}) \\ u_{l,m,n}/\sqrt{3} & (\text{type III in Fig.2c}) \end{cases}$$

输入函数的作用是将一神经元的所有输入信号根据其权值,得到一综合结果. 对该神经网络而言,其综合结果是计算出邻域单元对 $C(i, j, k)$ 单元在不同方向上的相对推移距离. 具体计算过程为:

(1) 将输入向量与权向量的相应分量相乘,得到一个新的 26 维向量 $\vec{P}'_{i,j,k}$,并将该向量的各个分量随时间步

长不断累加 ($C(i, j, k)$ 为空单元时, $\vec{P}'_{i,j,k}=0$), 即

$$\vec{P}'_{i,j,k}(t + \Delta t) = \vec{P}'_{i,j,k}(t) + \{\omega(i, j, k; l, m, n) \times b(i, j, k; l, m, n) | C(l, m, n) \in N(i, j, k)\}$$

(2) 将向量 $\vec{P}'_{i,j,k}$ 的 26 个分量中充填方向相对的一对分量求和,得到如下一个 13 维向量

$$\vec{P}_{i,j,k} = (d_1, d_2, \dots, d_{13})$$

令

$$a_{i,j,k}(t + \Delta t) = \max(d_1, d_2, \dots, d_{13}) \quad (4)$$

当 $a_{i,j,k} = 0$ 时,定义神经元 $C(i, j, k)$ 为空单元;当 $a_{i,j,k} \geq L$ 时, $C(i, j, k)$ 为充满单元;当 $0 < a_{i,j,k} < L$ 时, $C(i, j, k)$ 为界面单元.

神经元的输出函数取为如下阈值函数

$$r_{i,j,k} = \begin{cases} 1 & (a_{i,j,k} \geq L) \\ 0 & (a_{i,j,k} < L) \end{cases} \quad (5)$$

式中, L 为神经元的阈值. 其数值为离散网格的边长.

按照上述算法,经过足够长的时间,所有神经元的输出均为 1,系统达到稳定. 为了保证计算精度,必须选择适当的时间步长 Δt . Δt 过大时计算精度不够,太小会增加计算量. 一般取 $\Delta t = L/(10 \times u_{\max})$,能够满足计算精度要求 (u_{\max} 为最大瞬时充型速度).

2.3 充型过程的计算机模拟

用上述算法对消失模铸造充型过程进行计算机模拟,需完成以下步骤:

(1) 实体造型:用三维工具软件,生成 STL 格式的三维实体模型.

(2) 网格剖分:将实体模型剖分成立方体网格.

(3) 充型过程计算:按照上述离散模型及神经网络算法,以一定时间步长和初始条件循环计算,并将计算结果按一定要求保存.

(4) 结果显示:按单元编号、以三维形式显示不同时刻各单元的状态.

3 计算结果与实验验证

设计了两种典型的铸铁件消失模铸造试块对上述模型进行了验证. 一种为水平异形板,另一种为竖直板. 在一定工艺条件下(具体实验方法见文献 [8])测得不同时刻液态金属充型前沿的形态. 在相同的工艺参数条件下,进行计算机模拟计算. 两种试块的模拟结果及测试结果分别如图 3, 4 所示.

图中的测试结果显示出消失模铸造的充型形态与空腔铸造的充型形态显著不同. 在空腔铸造条件下,对异形板铸件,液态金属往往会沿内浇口开口方向喷射前进,然后向周围扩展;对竖直板铸件,其液态金属将先充填铸件

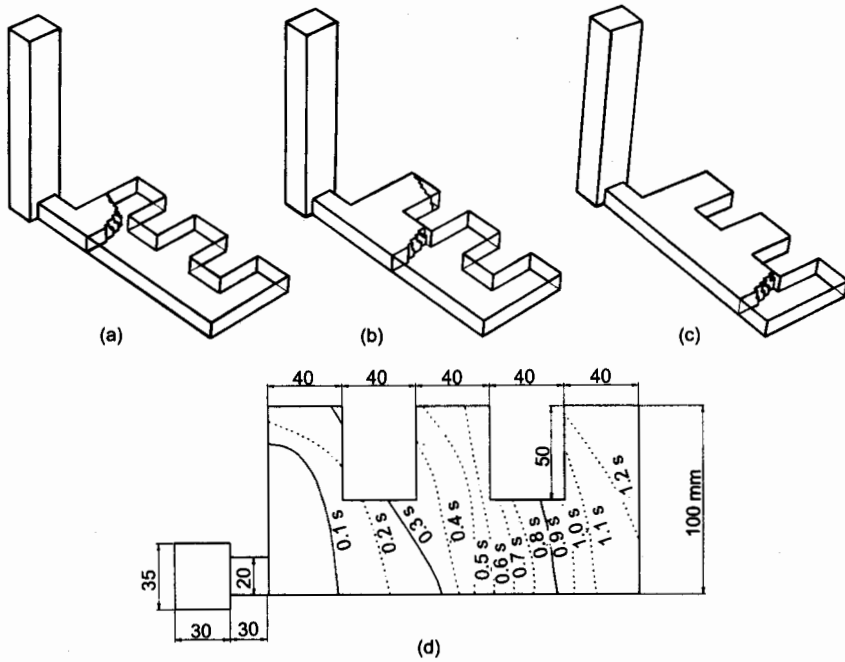


图 3 水平异形板充型界面的模拟结果及测试结果

Fig.3 Comparison of simulation with experiment on mold filling interface of shaped horizontal plate casting (process parameters: pattern density 13.2 kg/m³, pouring temperature 1370 °C, vacuum 0.047 MPa, down-sprue height 20 cm, pattern thickness 20 mm)

(a) simulation, 0.1 s (b) simulation, 0.3 s (c) simulation, 0.9 s (d) experiment

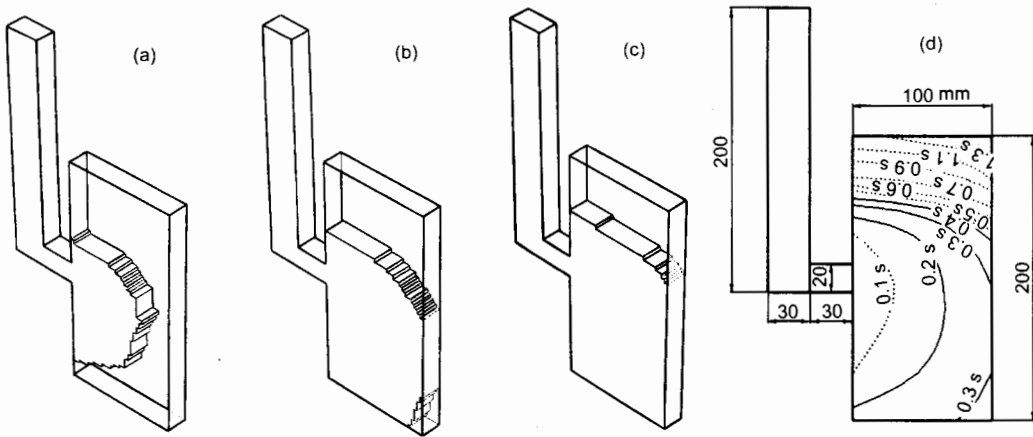


图 4 竖直板充型界面的模拟及测试结果

Fig.4 Comparison of simulation with experiment on mold filling interface of vertical plate casting (process parameters: pattern density 13.2 kg/m³, pouring temperature 1400 °C, vacuum 0.047 MPa, pattern thickness 20 mm)

(a) simulation, 0.2 s (b) simulation, 0.3 s (c) simulation, 0.4 s (d) experiment

底部, 超过内浇口后才逐层向上充填. 而实测的消失模充型形态显示出典型的放射状推移的特征 (竖直板条件下, 由于液态金属压头的变化, 下部的充填速度大于上部). 模拟结果反映了上述特征, 模拟结果与测试结果无论在充型形态还是充型时间上都符合得很好.

4 讨论

本文探讨了用一种新的自由表面计算模型和方法描述消失模铸造充型过程. 用该方法计算自由表面的位置时, 考虑了周围 26 个单元的综合影响. 目前空腔铸造充型过程模拟所广泛采用的 VOF 法, 仅考虑了周围 6 个单

元的影响. 本文并未在计算精度方面对所述方法与 VOF 法进行详细比较, 但用本文所述方法得到的充型形态模拟结果与文献 [1] 的结果相比, 显示出与实验观测结果更好的一致性.

根据所述充型过程的算法, 可以得到任意时刻界面推移的位置, 从而预测充型过程的缺陷. 同时, 利用该模型得出的推移界面, 并通过设定边界条件, 可由 N-S 方程和能量方程计算充型过程的流场、温度场, 预测铸件的收缩缺陷. 有关该方面的应用研究仍需进一步探索.

5 结论

根据消失模铸造充型过程的特点, 提出了充型过程的简化模型及离散处理方法. 并根据所提出的离散模型, 用人工神经网络算法计算了充型过程中不同时刻界面的位置. 实验结果表明: 所提出的消失模铸造充型过程的计算模型, 能够正确反映消失模铸造充型过程的特点, 用人工神经网络计算方法得到的模拟结果与测试结果无论在充

型形态还是充型时间上均较好符合.

参考文献

- [1] Gurdogan O, Huang H, Aakay H U, Fincher W W, Wilson V E. *Trans Am Foundrymen's Soc*, 1996; 104: 451
- [2] Wei Z J. *PhD Thesis*, Harbin Institute of Technology, 1996 (魏尊杰. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1996)
- [3] Chen Y-F, Chen R-C, Hwang W-S. *Trans Am Foundrymen's Soc*, 1997; 105: 459
- [4] Liu J, Ramsay C W, Askeland D R. *Trans Am Foundrymen's Soc*, 1997; 105: 435
- [5] Lee H S. *AFS Cast Met Res J*, 1973; 9: 112
- [6] Li F J, Lin Q S, Zhang D D, Shen H F, Liu B C. *Mod Cast Iron*, 2002; (1): 21 (李锋军, 林青松, 张殿德, 沈厚发, 柳百成. 现代铸铁, 2002; (1): 21)
- [7] Hill M W, Lawrence M, Ramsay C W, Askeland D R. *Trans Am Foundrymen's Soc*, 1997; 105: 443
- [8] Li F J, Liu B C, Zhang D D. *Mod Cast Iron*, 2001; (1): 35 (李锋军, 柳百成, 张殿德. 现代铸铁, 2001; (1): 35)