

# 型腔充填过程中气液两相流计算及 三维自由表面的确定

杨秉俭

(西安交通大学机械工程学院, 西安, 710049)

## NUMERICAL CALCULATION OF GAS-LIQUID TWO-PHASE FLUID FLOW AND DETERMINATION OF FREE-SURFACE FOR MOLD FILLING PROCESS

Yang Bingjian

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049)

**摘 要** 针对液体充填型腔过程的特点, 在固定计算域中数值模拟型腔充填过程中气液不相混两相流流场。采用了体积守恒形式的连续性方程, 以防止由于气液两相密度差大而引起的数值求解中的不收敛现象。将 PHOENICS 软件的流场计算与守恒标量求解大变形自由表面的方法相结合, 在固定计算域中完成了数值模拟三维液态充填型腔的过程。针对两种情况下的计算结果表明, 本文提出的方法可用于高速充填过程和复杂型腔充填过程的数值模拟。

**关键词** 型腔充填 气液两相流 自由表面 数值模拟

**中图分类号** O359

**Abstract** According to the features of mold filling, the velocity field of gas-liquid two phase flow was calculated in the fixed computational domain without mixed fluid. The continuum equation with conserved volume type was used to avoid divergence because of the big difference in density between gas and liquid. The conserved scalar equation was used to describe the free surface during the mold filling process, and the free surface was tracked by solving the conserved scalar equation under the condition of the given velocity field by PHOENICS code. Two cases were simulated with the method developed in the present paper, and the results showed that the method developed here can be easily used for the high speed filling process and 3-dimensional shaped cavity.

**Key words** mold filling, gas-liquid two-phase fluid flow, free surface, numerical simulation

型腔充填过程是液态金属和聚合物成形的关键步骤之一。对该过程数值模拟的目的是预测和控制因充填不当可能造成的工件缺陷。对于型腔充填过程的数值模拟来说, 首先得求解这一非稳态过程中的流体流动, 确定速度场的变化, 继而确定非稳态自由表面形貌的变化。近年来, 多用所谓的 SOLA-VOF 对充填过程进行模拟<sup>[1~3]</sup>, 即用 SOLA (Solution Algorithm) 法计算液体域中的流场, 然后用 VOF (Volume of Fluid) 法, 且引入根据上下游单元中界面的平均取向确定界面流率的 AD (Acceptor and Donor) 格式确定自由表面。但是, 由于此法本身存在不足, 使三维自由表面的确定繁琐, 且不易处理型腔背压等问题。

将气液两相流动按单相来处理的守恒标量法比起仅考虑液体区为计算域的 VOF 方法

有很多优点, 更易于进行三维型腔充填过程的计算<sup>[4]</sup>。本文欲借用计算流体动力学通用软件 PHOENICS<sup>[5]</sup> 的流场计算功能, 引入自由表面确定方法, 完成涉及气液两相流的三维充填过程的数值模拟。

## 1 控制方程和流场计算方法

设充填过程中的流体为不可压缩、非定常的牛顿流体。描述这一现象的基本方程为连续性方程及动量方程。其恒温条件下的张量形式方程如下:

连续方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = - \frac{1}{Q} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( M \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + g_i \quad (2)$$

其中:  $u_i$  和  $g_i$  分别表示  $x_i$  方向的速度分量及重力加速度分量;  $t$  为时间;  $P$  为压力;  $Q$  和  $M$  分别表示流体的密度和运动粘性系数。

由于采用单相的控制方程同时求解计算域中的气液两相流动时, 对于气液界面单元而言, 流入流体的密度与流出流体的密度差别很大。为了解决由此而引起的数值求解中的收敛困难, 将方程(1)用如下体积守恒形式的连续性方程替代

$$\frac{D(LnQ)}{Dt} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

选用 SIMPLEST 算法同时计算气液两个相区中的流场, 且计算域在每个时间步长中均固定。由于此时自由表面为内部界面, 故无须给出边界条件。由于气相区流场可直接计算出来, 所以背压便可直接求出。此外, 由于自由表面的运动, 计算域中任意控制容积中的气液两相的比例可能会发生变化, 因此, 在每一时间步长上, 均需要对整个计算域中任意控制容积的流体物性值作如下修正

$$Q = Q_l + (Q_g - Q_l) \delta \quad (4a)$$

$$L = L_l + (L_g - L_l) \delta \quad (4b)$$

式中: 下标  $l$  代表液体; 下标  $g$  代表空气。

## 2 自由表面的确定

根据 Liu 和 Spalding<sup>[6]</sup> 提出的守恒标量方程确定自由表面。数值试验表明, 非守恒形式的守恒标量  $\delta$  的控制方程在进行高速充填过程模拟时会出现物理上的不合理结果, 故本文采用如下形式的守恒型的守恒标量  $\delta$  的控制方程, 即

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial (u \delta)}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

在图 1 所示的网格上对上式按照控制容积法进行离散, 离散方程的一维形式如下

$$\delta_P^{t+1} = \delta_P^t - \frac{D}{\Delta x} (u_e^t \delta_e^t - u_w^t \delta_w^t) \quad (6)$$

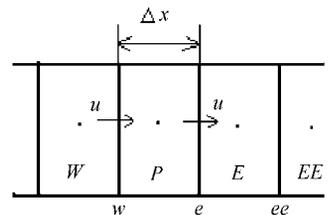


图 1 一维交错网格示意

论是上风差分还是中心差分自由表面都会出现所谓的界面模糊现象(Smearing),为此,SOLA-VOF方法采用了AD格式来消除这一现象,但AD格式不利于三维自由表面的确定;与之相比,守恒标量法采用了根据局部梯度来确定界面流率的van Leer格式<sup>[7]</sup>,这种格式形式简单便于进行三维计算。

以图1所示的一维剖分网格为例,在van Leer格式中

$$5_e = 5_P + D_x(55/5_x)_P(1 - u_e D_x/D_x)/2 \quad u_e > 0 \quad (7a)$$

$$5_e = 5_E - D_x(55/5_x)_E(1 + u_e D_x/D_x)/2 \quad u_e < 0 \quad (7b)$$

式中:  $5_e$  为东界面上的  $5$  值;  $5_P$  和  $5_E$  分别为  $P, E$  单元节点上的  $5$  值;  $(55/5_x)_P$  和  $(55/5_x)_E$  分别为  $P, E$  单元的局部梯度,其表达式如下

$$(55/5_x)_P = 2\text{sgn}(D) \min\{\hat{u}D\hat{u}, 0.5(\hat{u}D\hat{u} + \hat{u}D_w\hat{u}), \hat{u}D_w\hat{u}\}/D_x \quad (8a)$$

$$(55/5_x)_E = 2\text{sgn}(D) \min\{\hat{u}D\hat{u}, 0.5(\hat{u}D\hat{u} + \hat{u}D_e\hat{u}), \hat{u}D_e\hat{u}\}/D_x \quad (8b)$$

式中:  $D = 5_E - 5_P$ ;  $D_w = 5_P - 5_W$ ;  $D_e = 5_{EE} - 5_E$ ;  $\text{sgn}(D)$  为符号函数。为保证单调性,规定

$$\left. \begin{aligned} D_w D < 0, & \quad \left\{ \begin{aligned} \frac{55}{5_x} \Big|_P &= 0 \\ \frac{55}{5_x} \Big|_E &= 0 \end{aligned} \right\} \\ D_e D < 0, & \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

van Leer格式是显式差分格式,必须满足Courant数小于1的限制条件,即  $\left| \frac{u_e D}{D_x} \right| < 1$ ,对三维计算即为

$$D_t < \min\{\hat{u}D_x/\hat{u}, \hat{u}D_y/\hat{v}, \hat{u}D_z/\hat{w}\} \quad (10)$$

### 3 数值模拟结果

#### 3.1 高速充填过程

用上述方法对Smith等<sup>[8]</sup>的压力铸造水模拟实验进行数值模拟,通过模拟结果与实验结果的对比分析,验证所开发的整套软件模拟充填过程,尤其是高速充填过程的可靠性。

实验所用型腔为简单的矩形,如图2。在型腔的下部,左右两侧各有一个对称的内浇口,其入口速度均为15.8 m/s。从理论上讲整个充填过程中自由表面的变化应该是左右对称的,因而可以精确而又方便地检验所开发的软件的正确性。假定充填为紊流流动,用k-E紊流模型模拟化涡粘性系数的变化。

考虑到该型腔的具体形状,在模拟计算中, $x, y, z$  3个方向上分别采用了等剖分。其中, $z$  向的间距  $D_z$  为1mm;  $x$  和  $y$  向的间距  $D_x$  和  $D_y$  均为3.175mm。整个计算域由  $3 \times 32 \times 48$ , 即4608个剖分单元组成。计算是在586/100兼容机上进行的,CPU时间约10h,计算得到的中间切面上的流场与自由表面随时间的变化如图3所示。为了清楚起见,气体域的流场未显示。

从图3可知,计算获得的结果具有良好的对称性,并且与图2所示的实验结果中的自由表面形貌基本相同,这说明用守恒形式的守恒标量方程及其离散式是合适的,尤其适用于高速充填过程的模拟。

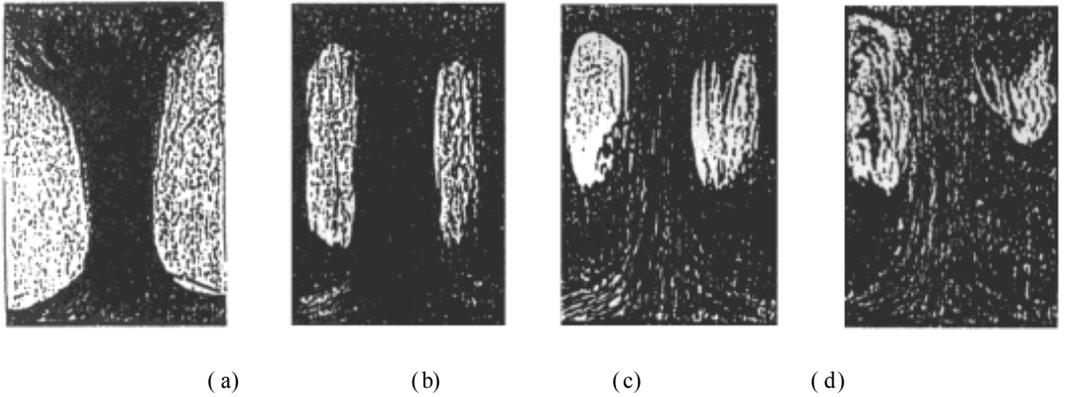


图 2 压力铸造水模拟试验高速摄影结果<sup>[8]</sup>

(a)  $t = 0.031s$ ; (b)  $t = 0.047s$ ; (c)  $t = 0.073s$ ; (d)  $t = 0.094s$

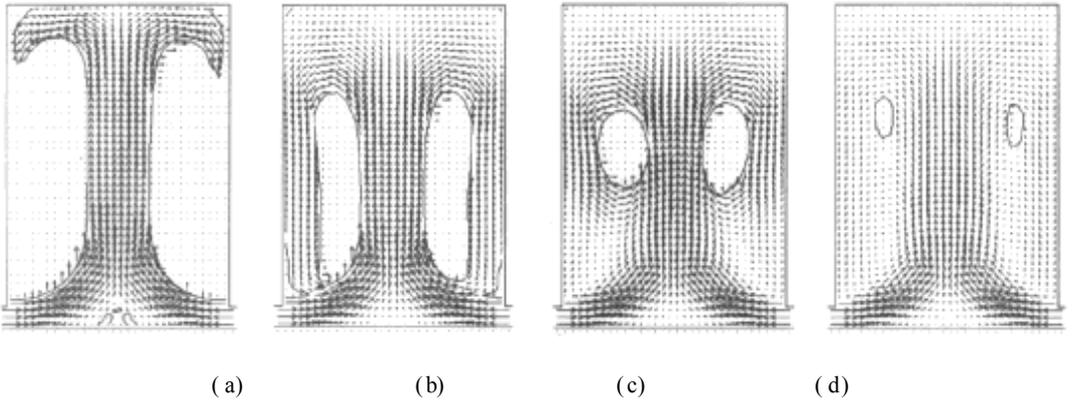


图 3 采用 k-E 模型对压铸水模拟实验的模拟结果

(a)  $t = 0.0306s$ ; (b)  $t = 0.0465s$ ; (c)  $t = 0.0723s$ ; (d)  $t = 0.0943s$

### 3.2 复杂型腔的充填

针对如图 4 所示的水模拟实验装置进行数值模拟。模拟计算中, 将浇口杯的液面高度恒取为 100mm, 忽略进入浇口杯的液流速度对充填过程的影响。整体计算域在空间上就是包含型腔及浇注系统的规则长方体, 其中流动域由浇口杯、直浇道、横浇道和型腔 4 部分组成, 如图 4。利用 PHOENICS 软件包中的通度系数法实现型腔中的芯子对流体流动的阻碍效果。在 3 个方向上采用相同的网格间距,  $D_x = D_y = D_z = 10mm$ , 这样, 总的剖分单元为 10 920 个。

假定充填为紊流流动, 将代数应力模型用于模拟计算中。计算得到的三维自由表面在不同时刻的形貌如图 5 所示。图 6 给出了充填过程中图 4 中 A-A 断面上流场和自由表面变化的模拟结果, 相应断面的实验结果如图 7。为了清楚起见, 气体域的流场未显示。可以看出计算结果与实验结果基本一致。说明本文建立的模型和方法适合于复杂型腔的充填过程模拟。

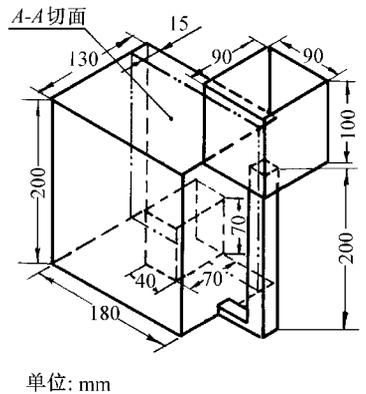


图 4 三维水模拟实验装置

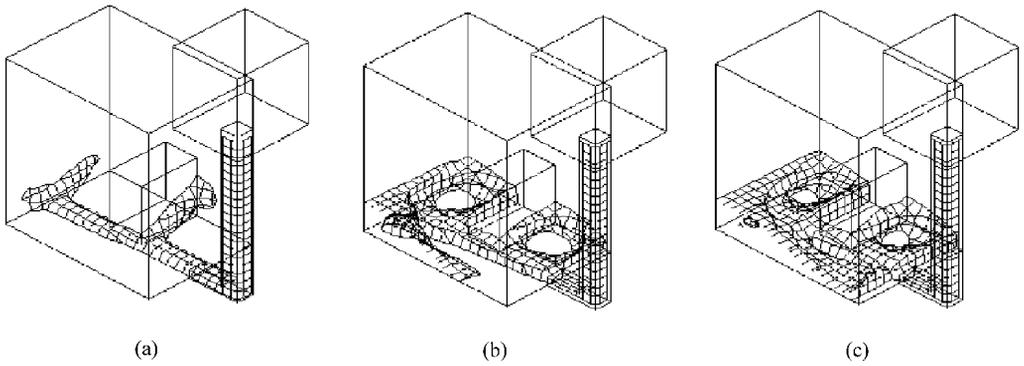


图 5 不同时刻三维自由表面的形貌  
(a) $t=0.42\text{s}$ ; (b) $t=0.72\text{s}$ ; (c) $t=1.01\text{s}$

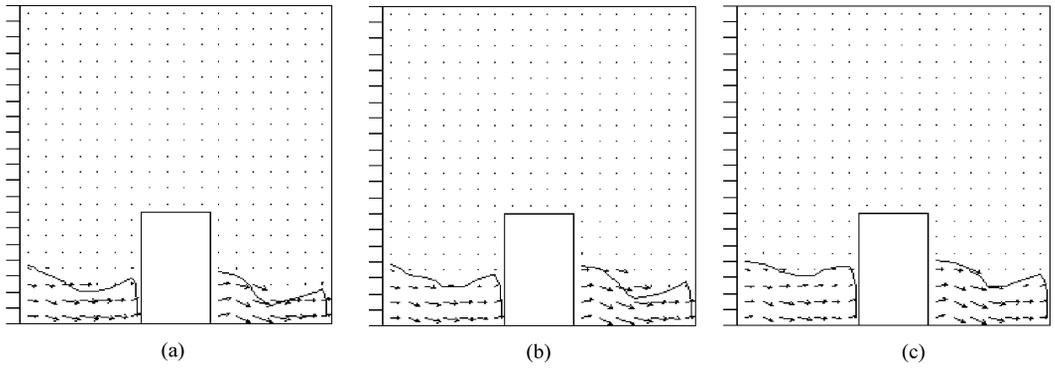


图 6 断面 A-A 上流场和自由表面变化的模拟结果  
(a) $t=1.001\text{s}$ ; (b) $t=1.488\text{s}$ ; (c) $t=2.081\text{s}$

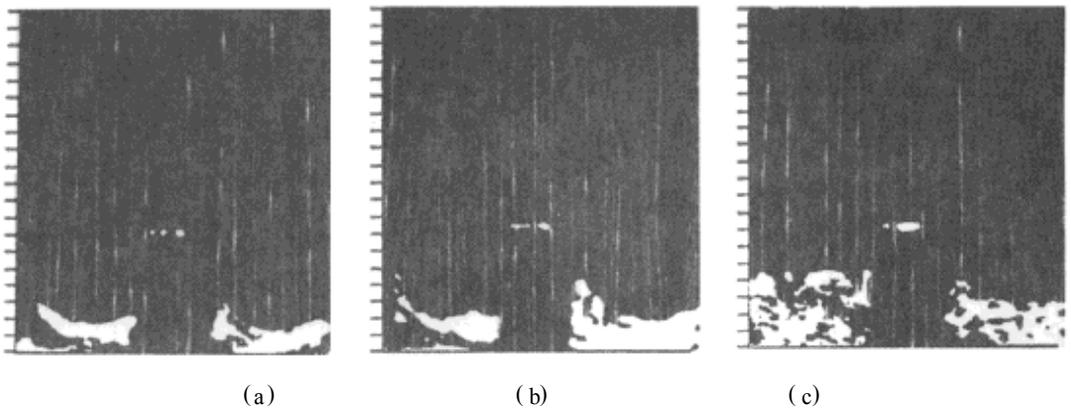


图 7 实验获得的断面 A-A 上自由表面的变化  
(a) $t=1.00\text{s}$ ; (b) $t=1.40\text{s}$ ; (c) $t=2.08\text{s}$

## 4 结 论

(1) 采用单相控制方程求解计算域中的气液两相流动时, 为了防止数值求解中的发散, 连续性方程需用体积守恒形式。

(2) 数值试验表明, 守恒标量方程是确定自由表面位置和取向的有效方法。为了防止对高速充填过程模拟时可能出现的物理上的不合理结果, 守恒标量方程应采用非守恒形式。

(3) 本文将 PHOENICS 软件的流场计算与确定自由表面的守恒标量方程相结合进行型腔充填的数值模拟是可行的。

(4) 计算结果与实验结果的对照表明, 开发的基于 PHOENICS 软件的液体充填过程数值模拟软件是可靠的, 可作为数值模拟计及凝固现象的充填过程的基础。

## 参 考 文 献

- 1 Lin H J, Hwang W S. 3-D fluid flow simulation for mould filling. AFS Trans, 1989, 97: 855~862
- 2 Xu Z A, Mampey F A. Experimental and simulation study on mold filling coupled with heat transfer. AFS Trans, 1994, 102: 181~190
- 3 袁浩扬. 铸造充型过程传热与流动耦合数值模拟的研究: [学位论文]. 武汉: 华中理工大学, 1995
- 4 蔡临宁, 杨秉俭, 苏俊义. 充填过程中流动现象的三维数值模拟. 铸造, 1996, (6): 1~4
- 5 Spalding D B, et al. PHOENICS Manual TR200. London: CHAM Ltd, 1984
- 6 Liu Jun, Spalding D B. Numerical simulation of flows with moving interfaces. Physicochemical Hydrodynamics, 1988, 10(5/6): 625~637
- 7 van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. IV. A new approach for numerical convection. J of Comp Physics, 1977, 23: 276~299
- 8 Smith W E, Wallace J F. Gating of die castings. AFS Trans, 1963, 71: 325~348

## 中国航空学会重量工程学术交流会征文

中国航空学会定于一九九八年四季度召开“中国航空学会重量工程专业第七届学术交流会”, 现将会议征文范围及要求通知如下:

### 1. 征文范围

1 在飞行器、船舶和交通运输工具研制中, 重量工程专业的研究成果、实践经验与发展方向探讨;

- ° 重量设计与试验技术研究;
- » 计算机技术在重量工程专业中的应用;
- ¼ 国外状况与国际交流。

2. 征文稿件要求 论文中心思想明确、文字简练、语言通畅, 一般不超过 5000 字。凡拟参加学术交流会的论文请将其题目、摘要于 1998 年 6 月 1 日前寄给会议筹备单位, 到 7 月 1 日截止。论文(全文复印件)于 1998 年 8 月 1 日前寄给会议筹备单位。

论文请用挂号信寄出。

通讯地址: 成都市三九四信箱一分箱 孙振家收

邮政编码 610041

电 话: (028)5509238 或 5509928

3. 会议地点: 海南三亚

(李铁柏)