

文章编号: 1004 - 0609(2003) 01 - 0035 - 05

# 半固态铝合金铸件触变充型过程的模拟<sup>①</sup>

杨卯生<sup>1, 2</sup>, 徐 宏<sup>1</sup>, 毛卫民<sup>1</sup>, 赵爱民<sup>1</sup>, 钟雪友<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 内蒙古工业大学 材料科学与工程学院, 呼和浩特 010062)

**摘 要:** 在充分考虑半固态 AlSi7Mg 合金触变充型过程中压力和速度变化特征基础上, 建立耦合半固态表观粘度的三维流场数学模型, 确定固定流量的入流边界条件和约束滑动型壁边界条件以及保持入流温度不变的初始条件, 并采用 SOLA-VOF 法对铝合金件的触变充型过程进行了模拟计算。结果表明, 由于半固态表观粘度随剪切速率增大而下降, 造成局部浆料充型速度的复杂变化, 从而使半固态合金呈现剪切变稀的触变成形特点。由于充型时间极短, 浆料在充型过程中降温小于 1 °C。刹车泵体模拟计算结果展示了模拟与实际成形结果的一致性。

**关键词:** 充型模拟; 表观粘度; 半固态; 边界条件

**中图分类号:** TG 249.9

**文献标识码:** A

自 80 年代初 Stochr 及黄文星开展充型过程数值模拟以来, 流场数值模拟技术已经广泛用于预测金属充型过程缺陷形成以及指导工艺设计<sup>[1~3]</sup>。目前, SOLA-VOF 成为流场模拟有效的算法而得到广泛应用, 随着研究的不断深入和商品化软件不断完善, 流场模拟已经较多地应用于实际砂型、金属型以及低压铸造充型过程的计算, 并取得了符合实际情况的模拟结果。半固态触变充型是一个瞬时、动态变粘度过程, 其触变性能不仅取决于合金细观组织结构、固相体积分数和剪切速率, 还与时间以及过程密切相关。在触变充型过程中, 半固态合金快速通过浇道充填型腔, 剪切速率受压射速度和浇道几何尺寸影响而发生较大变化, 从而导致浆料粘度变化, 使得浆料在充型过程中呈现非常复杂流动形态<sup>[4~7]</sup>。目前较多采用表观粘度描述半固态合金触变特性。半固态数值模拟的关键技术就是建立正确的表观粘度的数学描述以及选择合理的边界条件和初始条件。由于数值模拟技术可以描述难以以实验观察的半固态复杂的触变成形过程。国内外学者对其进行了大量的研究并取得了一些进展<sup>[8~12]</sup>, 但开发半固态触变充型过程的模拟软件并将其应用到复杂铸件上的研究报道还不多见。本文作者首先确定计算所需要的基本方程、边界条件以及表观粘度数学描述, 并建立耦合表观粘度的充型模拟方程。在此基础上, 计算并分析半固态铝合金件的触变充型过程。最后, 对刹车泵体的触变成形过程进

行了模拟计算。

## 1 模拟计算模型建立

### 1.1 基本控制方程

半固态合金充型过程流动属于带有自由表面变粘性不可压缩非稳态流动。描述半固态合金流动方程主要有质量守恒方程、动量守恒方程、能量方程以及体积函数方程。

①质量守恒方程(连续性方程)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{\mathbf{u}}) = 0 \quad (1)$$

②动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}_m) + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}_m) = \text{div} \mathbf{P}_m + \mathbf{g}_m - \mathbf{f}_m \quad (2)$$

式中  $\mathbf{u}_m$  表示  $m$  方向的流速分量;  $\mathbf{g}_m$  为作用在单位体积流体  $m$  方向的体积力;  $\mathbf{P}_m$  为表面力矢量(包括表面静压力和流体粘性应力);  $\mathbf{f}_m$  为作用在单位体积流体的反方向阻力, 是流体通过多孔介质或相向运动的两相流体中时所应考虑的;  $\rho$  为流体密度。

③体积函数方程(自由表面控制方程)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial F}{\partial X} + \mathbf{v} \frac{\partial F}{\partial Y} + \mathbf{w} \frac{\partial F}{\partial Z} = 0 \quad (3)$$

式中  $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$  分别为  $X, Y, Z$  方向的流速分量,  $F$  为流体体积函数。

离散格式采用美国帕坦卡教授提出的交错网格

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59995440); 教育部博士点基金资助项目(1998000807)

收稿日期: 2002-01-05; 修订日期: 2002-09-27 作者简介: 杨卯生(1963-), 男, 副教授, 博士

通讯联系人: 杨卯生, 副教授, 北京科技大学电冶金研究所; 电话: 010-62390323; E-mail: mshyang@sian.com.cn

形式<sup>[13]</sup>。

④表观粘度方程

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 (\dot{\gamma})^{-m} \tag{4}$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_i}{\partial X_j}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_i}{\partial X_k}\right)^2} \tag{5}$$

式中  $\dot{\gamma}$  为剪切速率,  $\eta$  为浆料粘度。

1.2 初始条件

半固态金属浆料瞬时充满型腔, 可认为在充型过程中的开始阶段, 初始温度场为半固态金属的入口充型温度。由于触变充型时间极短, 在这个过程中, 浆料降温较小。表观粘度不考虑温度变化的影响, 即有

$$T(X, Y, Z, 0) = T_0 \tag{6}$$

1.3 边界条件

1.3.1 入流边界条件

半固态触变充型过程的入流边界设在内浇口处, 由于半固态压铸设备具有固定的浆料充填流量值, 当浇口横截面积确定, 浇口处浆料速度值在充型过程不发生变化, 入口压力即为浆料压送压力, 为保证一定入流速度(充填速度), 入流压力随充型时间作非线性波动变化, 变化幅度很小。试验中采用两种形式的压铸机, 其规格如下:

1) 0.1 MN 半固态压铸机, 压室直径为  $d60$  mm, 最大柱塞推进速度为  $0.24$  m/s, 行程为  $120$  mm, 最大件为  $520$  g, 最长充型时间  $0.5$  s。

2) 200 MN 半固态压铸机, 压室尺寸为  $d80$  mm 和  $150$  mm  $\times$   $80$  mm 两种, 行程为  $150$  mm, 最大柱塞推进速度为  $0.24$  m/s, 最大件  $2$  kg。最长充型时间为  $0.5$  s。

1.3.2 型壁速度边界条件

图 1 所示为铸型壁单元示意图, 其速度边界条件的确定为:

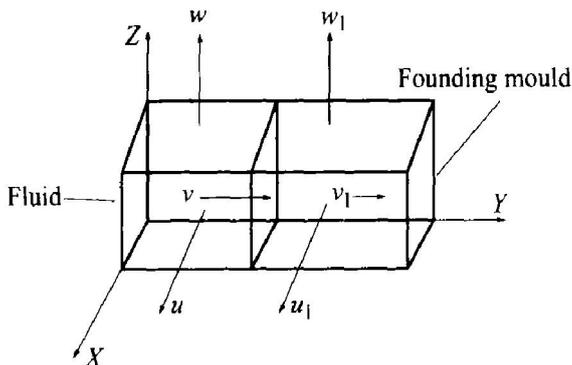


图 1 型壁单元示意图

Fig. 1 Schematic of wall unit

自由滑动边界  $u_1 = u, v_1 = 0, w_1 = w$ ;

无滑动边界  $u_1 = -u, v_1 = 0, w_1 = -w$ ;

实际使用中,  $u_1 = Ku, v_1 = 0, w_1 = Kw$ 。

式中  $u, v, w$  分别为型壁处半固态浆料沿  $X, Y, Z$  方向的运动速度, 下角标 1 代表铸型。

根据工艺条件不同,  $K$  值取值范围在  $(-1, 1)$  之间变化, 它的大小取决于铸型条件、合金种类以及温度等因素。半固态浆料的粘度较液体金属要大, 在充型过程中具有剪切变稀的特点。且铸型为钢模具。铝合金熔点较低, 模具预热温度达到  $300$   $^{\circ}\text{C}$ , 充型过程降温较少, 为此取  $K = 0$ 。

1.4 数值稳定性条件

1) 对流限定条件 在一个时间步长内流体的运动不能超过一个单元

$$\delta t < \min \left\{ \frac{\delta X_{i+\frac{1}{2}}}{|u_{i+\frac{1}{2}, j, k}|}, \frac{\delta Y_{j+\frac{1}{2}}}{|v_{i, j+\frac{1}{2}, k}|}, \frac{\delta Z_{k+\frac{1}{2}}}{|w_{i, j, k+\frac{1}{2}}|} \right\}$$

2) 扩散限定条件 在一个时间步长内流体的动量扩散不能超过一个单元

$$\delta t < \min \left\{ \frac{3}{4\mu_i} \left[ \frac{\delta X_i^2 \delta Y_j^2 \delta Z_k^2}{\delta X_i^2 \delta Y_j^2 + \delta Y_j^2 \delta Z_k^2 + \delta X_i^2 \delta Z_k^2} \right] \right\}$$

式中  $\mu_i$  为泊松比。

3) 表面张力限制 在一定时间步长内, 表面张力波不能超过一个单元。

$$\delta t^2 < \min \left\{ \frac{\rho \delta X_i^3}{4\sigma}, \frac{\rho \delta Y_j^3}{4\sigma}, \frac{\rho \delta Z_k^3}{4\sigma} \right\}$$

式中  $\sigma$  为流体表面张力。

2 半固态充填流动特征

图 2 显示了触变充型过程的模拟计算结果。半固态浆料开始充填时, 如图 2(a) 所示, 浆料前沿较钝并逐渐向两边扩展。当浆料靠近型壁时, 如图 2(b) 所示, 由于摩擦作用, 边缘处的剪切速率加大, 从而降低该处的粘度值。进而降低粘滞力, 边缘处浆料流动速度反而加快。最后导致充填前沿逐渐趋于平坦, 如图 2(c), (d) 所示, 当充型量完成 80% 时, 以平界面进行充填, 此时充填流动形态形式上很类似液态金属的紊流流动, 但依据的机理是完全不同。

图 3 显示了半固态端盖件触变充型过程的模拟计算结果。开始充填时, 如图 3(a) 所示, 浆料前沿较钝并逐渐向两边扩展。由于端盖浇口处的截面逐渐变大, 浆料迅速靠近型壁并沿壁运动, 如图 3(b)

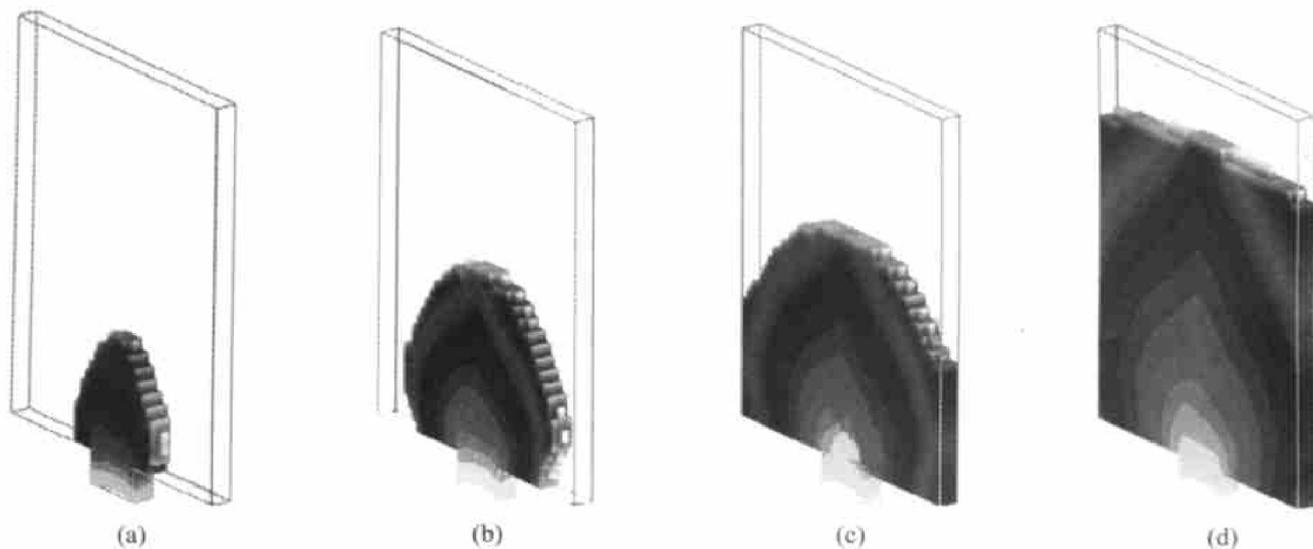


图 2 半固态平板件充型过程模拟计算结果

Fig. 2 Filling simulation results of semi-solid alloy (filling velocity 2 m/s)

(a) —Filling 10%; (b) —Filling 30%; (c) —Filling 50%; (d) —Filling 80%

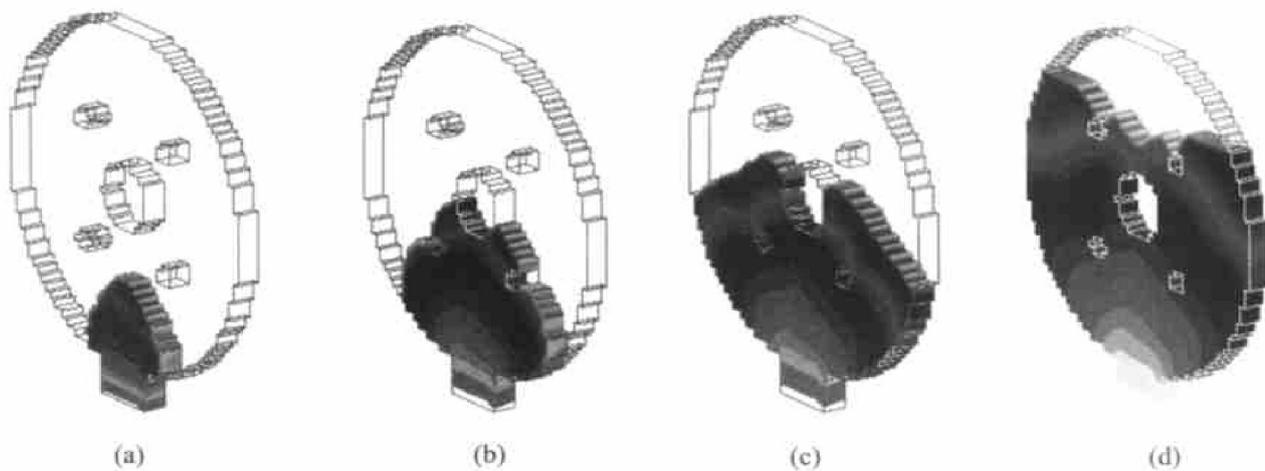


图 3 半固态端盖件充型过程模拟计算结果

Fig. 3 Filling simulation results of semi-solid alloy tip cover (filling velocity 2 m/s)

(a) —Filling 10%; (b) —Filling 30%; (c) —Filling 50%; (d) —Filling 80%

所示。同样由于边缘摩擦作用, 边缘处浆料流动速度加快, 如图 3(c) 所示。当浆料充型遇到障碍时, 半固态合金具有较液态金属大的粘度和剪切变稀性能, 出现附壁流动而没有飞溅现象。整个过程为层流, 经过障碍后, 浆料充填前沿逐渐趋于平坦, 呈反重力全壁厚流动方式, 直到充满整个模具型腔, 如图 3(d) 所示。

### 3 模拟结果验证

为了验证所开发的半固态充型过程模拟程序的可靠性, 针对半固态刹车泵体铝件径向注入工艺进行计算, 并与实际浇注结果进行对比。刹车泵体铝铸件(包括浇口)约 900 g, 材质为 AISi7Mg 合金,

轮廓尺寸为 230 mm × 104 mm × 74 mm, 在 A, B (见图 4) 容易出现充不满的铸造缺陷。在一定充型时间范围内, 选取合适的入流速度、模具温度和注入方式是保证成形质量的关键。实际浇注使用 2 MN 半固态压铸机, 模具预热温度为 300 °C。为了进一步检验计算程序, 首先观察计算结果的对称性和自由表面的运动情况, 并计算保证半固态成形质量的触变充型时间。

实体造型与网格划分如图 4 所示, 网格单元尺寸为 3 mm × 3 mm × 3 mm, 单元总数为 115 056。压室面积为 150 mm × 80 mm, 浇口面积为 15 cm<sup>2</sup>, 入流速度为 1.4 m/s。充型过程的计算结果如图 5 所示, 充型过程的开始阶段, 如图 5(a), (b) 所示, 半固态呈层流流动平稳充填, 到充型量 50% 时,

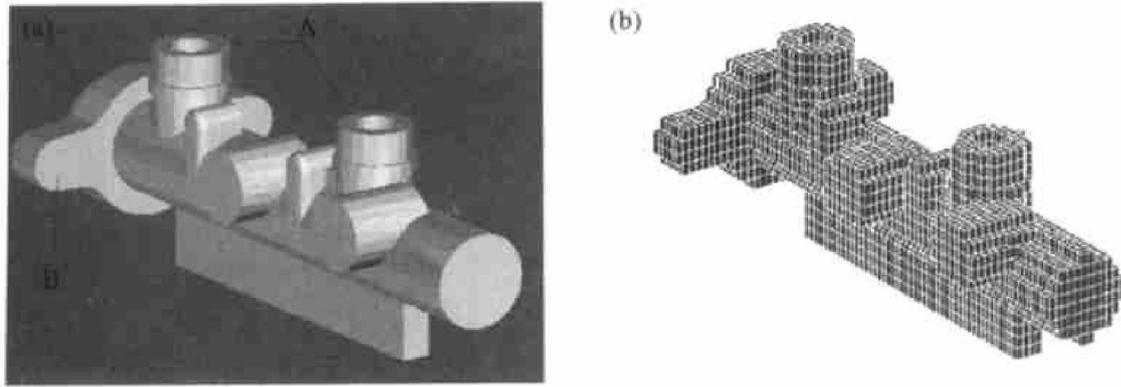


图 4 刹车泵体实体造型和 FDM 网络模型

Fig. 4 Solid mold and FDM grid model of aluminum brake pump casting

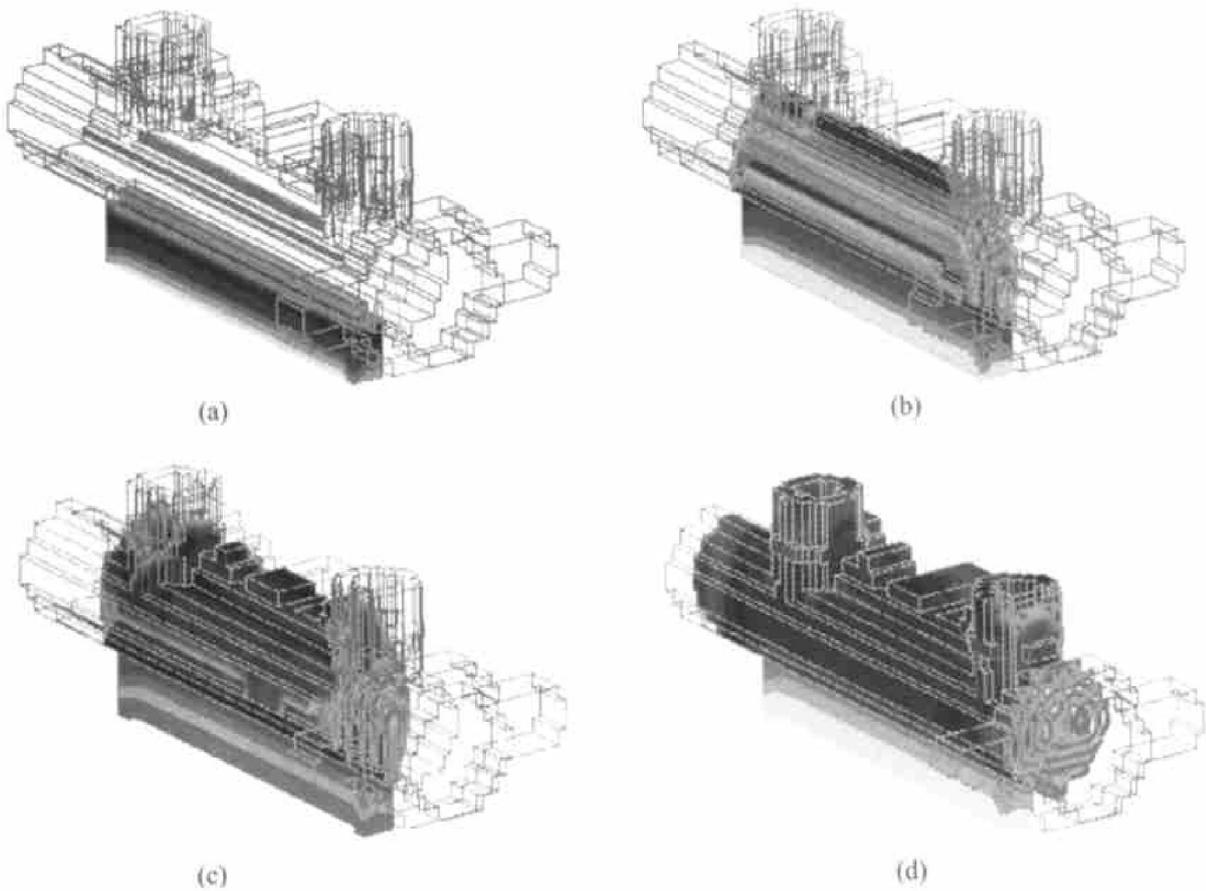


图 5 半固态刹车泵体的充填流场模拟计算结果

Fig. 5 Filling simulation results of aluminum brake pump

(a) —Filling 10%; (b) —Filling 30%; (c) —Filling 50%; (d) —Filling 80%

浆料上升流动并开始充填 A 处; 等到充型完成 80% 时, 如图 5(d) 所示, A 处基本充满, 浆料向两边扩展并开始充填 B 处, 直到最后整个铸件全部充满。充型过程平稳没有浆料飞溅。充型时间为 0.13 s。浆料最大降温为 0.6 °C。

依据上述工艺条件所生产的刹车泵体成形结果表明, 触变充型时间为 0.2 s, 制件没有发现充不满、气孔等铸造缺陷, 与模拟结果基本相符。

REFERENCES

[1] 李晨曦. 铸造充型过程流场计算机模拟技术述评[J]. 铸造, 1997(2): 47 - 50.  
 LI Chen-xi. Comments on computer simulation of mold filling in casting process[J]. Foundry, 1997(2): 47 - 50.

[2] 周彼德, 薛 祥, 糜忠兰. 铸件三维充型过程耦合数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(2): 230 -

- 233.
- ZHOU Bi-de, XUE Xiang, MI Zhong-lan. 3D coupling numerical simulation of mold filling [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10(2): 230 - 233.
- [3] 杨建伟. 异形坯连铸过程流场与温度场耦合三维数值模拟[J]. *金属学报*, 2001, 37(7): 767 - 771.
- YANG Jian-wai. 3-D coupling numerical simulation for flowing distribution and temperature distribution in beam blank continuous casting process [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(7): 767 - 771.
- [4] Kumar P, Martin C, Brown S. Shear rate thickening flow behavior of semi-solid slurries [J]. *Metallurgical transactions A*, 1993, 24: 1107 - 1116.
- [5] Flemings M C. Behavior of metal alloys in the semi-solid state [J]. *Metall Trans*, 1991, 22B(6): 269 - 293.
- [6] Kattamis T Z, Piccone T J. Rheology of semi-solid Al-4.5% Cu-1.5% Mg alloy [J]. *Mater Sci Eng*, 1991, A131: 265 - 272.
- [7] 朱鸣芳, 高志强, 苏华钦. 半固态 ZA12 合金的瞬态流变性能[J]. *金属学报*, 1999, 35: 1021 - 1023.
- ZHU Ming-fang, GAO Zhi-qiang, SU Hua-qin. Study on the transient state rheological behavior of semi-solid ZA12 alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1999, 35: 1021 - 1023.
- [8] Upadhyaya G P. Comprehensive casting analysis model using a geometry-based technique followed by fully coupled 3-D fluid flow, heat transfer and solidification kinetic calculation [J]. *AFS Trans*, 1992, 100: 925 - 933.
- [9] 谢水生, 沈键, 张学军. 数值模拟在半固态金属加工中应用[J]. *塑性工程学报*, 2000, 7(1): 6 - 10.
- XIE Shu-sheng, SHEN Jian, ZHANG Xue-jun. Numerical simulation in semi-solid metals forming process [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2000, 7(1): 6 - 10.
- [10] 崔成林, 毛卫民, 赵爱民. 半固态触变压铸成形过程模拟与验证[J]. *北京科技大学学报*, 2001, 23(3): 237 - 240.
- CUI Cheng-lin, MAO Wei-min, ZHAO Ai-min. Verification and numerical simulation for semi-solid modeling the thixforming process [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2001, 23(3): 237 - 240.
- [11] Kim N S, Kang C G. An investigation of flow characteristics considering the effect of viscosity variation in the thixforming process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 103: 237 - 246.
- [12] Wang C M, Nickodemus G H, Creeden T P. Determining optimal semi-solid forming process parameters by simulation technique [A]. *The 5th Int Conf on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites [C]*. Colorado, USA. 1998, 327 - 332.
- [13] Patankar S V, Spalding D B. A calculation procedure for heat mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1972, 15(a): 1787 - 1806.

## Filling simulation on semi-solid forming for aluminum casting

YANG Mao-sheng<sup>1, 2</sup>, XU Hong<sup>1</sup>, MAO Wei-min<sup>1</sup>, ZHAO Ai-min<sup>1</sup>, ZHONG Xue-you<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Materials Science and Engineering, InnerMongolia Polytechnic University, Huhehaote 010062, China)

**Abstract:** Based on the behavior characters of pressure and flow velocity during semi-solid AlSi7Mg slurry filling processes, a three dimensional model of slurry flow coupled with apparent viscosity was established. The filling simulation of the semi-solid forming process for semi-solid aluminum casting was investigated with the help of the SOLA-VOF algorithm. And fixed volume of flow and sliding along wall were used for boundary conditions, slurry temperature was used for initiation condition. Results demonstrate that apparent viscosity decreases with the increase of shear rate, semi-solid alloy shows that shearing thinning thixotropy and its temperature differential is below 1 °C in the course of the filling.

**Key words:** filling simulation; apparent viscosity; semi-solid; boundary condition

(编辑 吴家泉)