

低压铸造铝合金轮毂充型与凝固模拟^①

闻星火^{†, ††} 康进武^{††} 熊守美^{††} 柳百成^{††}

† (清华大学实验室与设备处, 北京 100084) †† (清华大学机械系, 北京 100084)

摘要 在低压铸造过程温度场及流场实验的基础上, 开发了基于 SOLA-VOF 算法的充型与凝固过程数值模拟软件, 对 72-46 轮毂铸件进行了模拟分析。结果表明, 低压铸造充型过程中降温明显, 准确的凝固模拟必须首先考虑充型。针对轮毂铸件的充型特点, 开发了简化充型模拟软件。简化模拟得到的初始温度场与采用 SOLA-VOF 算法的模拟结果基本吻合, 实现了为后续凝固模拟提供正确的初始温度场的设计目标。

关键词 低压铸造 充型模拟 凝固模拟 轮毂铸件 简化算法

中图法分类号 TG21, TG249

低压铸造是近年来发展起来的近无余量铸造工艺。由于其具有充型平稳可控, 在压力下补缩、凝固, 因而具有内部质量高, 铸件尺寸精度较高等优点, 成为铝合金汽车轮毂铸件的主要生产工艺, 并正在向铝合金汽车缸盖、缸体以及底盘类零件的生产领域拓展。

充型是低压铸造过程的一个重要阶段。由于低压铸造多数采用金属模具, 充型过程平稳、速度较慢, 因此充型过程中金属液及模具的温度变化较大。为提高凝固过程模拟分析的正确性, 应当考虑充型过程流动对初始温度场的影响。

自 80 年代初 Stoehr R A 及黄文星系统开展这方面工作以来, Sahm, Hansen, 王君卿及安斋浩一等人也相继进行了深入的研究, 取得了一系列成果^[1-3]。在充型过程数值模拟研究中主要采用以下几种方法: Simple 算法、MAC/SMAC 算法及 SOLA-VOF 算法。其中 SOLA-VOF 算法是目前应用最为广泛的方法。国外一些著名的铸造过程模拟软件, 如 Procast, MAGMASOFT 等均采用了 SOLA-VOF 算法。

本文针对低压铸造充型与凝固过程, 以低

压铸造模具的温度场测试及“中途卸压”试验为基础, 开发出低压铸造充型与凝固过程模拟软件。应用所开发的软件对实际轮毂铸件进行了模拟分析。同时, 根据轮毂类铸件的充型特点, 从提供合理的初始温度场的角度出发, 对简化充型模拟进行了研究。从而解决了基于 SOLA-VOF 算法的充型模拟计算时间长, 实际应用比较困难的问题。

1 实验方法

为提供模拟研究的实验依据, 首先进行了“中途卸压”试验及低压铸造模具的温度场测试。实验选用戴卡轮毂制造有限公司的 72-46 轮毂。

1.1 “中途卸压”试验

“中途卸压”试验采用在轮毂充型过程中突然卸压的方法检测轮网的充型高度及充型状态^[5]。图 1 为试验结果示意图, 从测试结果来看, 金属液在充填轮网过程中平稳, 未出现明显波动。

1.2 低压铸造模具的温度场测试

通过温度场测试可获得低压铸造模具在稳

① 收稿日期: 1998-03-09; 修回日期: 1998-05-11 闻星火, 男, 32 岁, 博士, 讲师

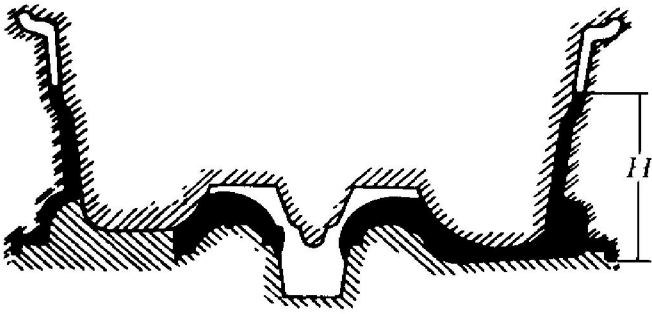


图1 充型4.69s卸压结果示意图

Fig.1 Result of pressure discharge after filling 4.69 s

H—Filling height of wheel mesh

定生产状态下各测温点的温度变化情况^[6]。图2为模具上热电偶及冷却系统分布情况。图3为稳定条件下各测温点的温度变化曲线。测试结果表明,各测温点温度多在400~550℃范围内变化。

2 流场模拟

从“中途卸压”试验可见,低压铸造充型过程平稳,因此在充型模拟中采用层流模型。耦合传热的低压铸造充型过程控制方程如下。

动量方程:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} \quad (1)$$

连续性方程:

$$\text{div} \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

能量方程:

$$c_p \frac{d\theta}{dt} + c_p \mathbf{v} \text{grad} \theta = \frac{1}{\rho} \text{div}(\lambda \text{grad} \theta) + S \quad (3)$$

对自由表面的处理采用VOF法,即采用体积函数方程:

$$\frac{dF}{dt} + \text{div}(F\mathbf{v}) = 0 \quad (4)$$

式中 $\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2}$ 为拉普拉斯算子;

div 为散度, $\text{div} = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$;

\mathbf{v} —速度, m/s; c_p —比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot$

K^{-1} ; \mathbf{f} —速度方向上的力, N; ρ —密度, $\text{kg} \cdot$

m^{-3} ; p —压力, Pa; λ —导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot$

K^{-1} ; θ —温度, $^{\circ}\text{C}$; μ —动力粘性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; t —时间, s; S —内热源, J; F —流体体积率, m^3 。

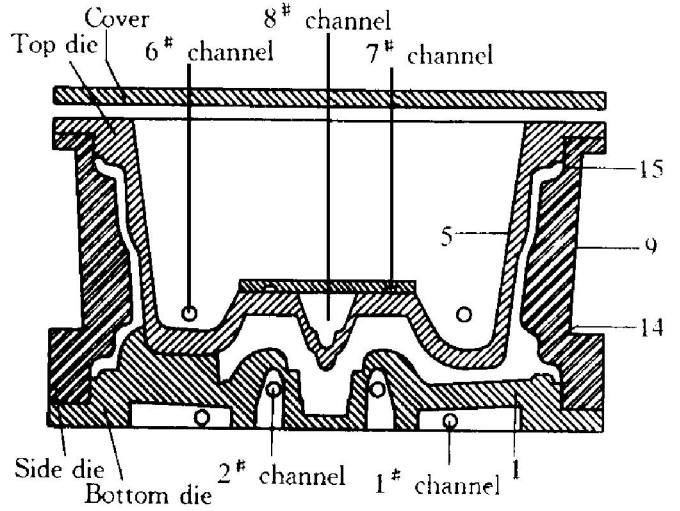


图2 模具上热电偶与冷却系统布置示意图

Fig.2 Location of thermocouples and cooling system in die

1, 5, 9, 14, 15—Position of thermocouples

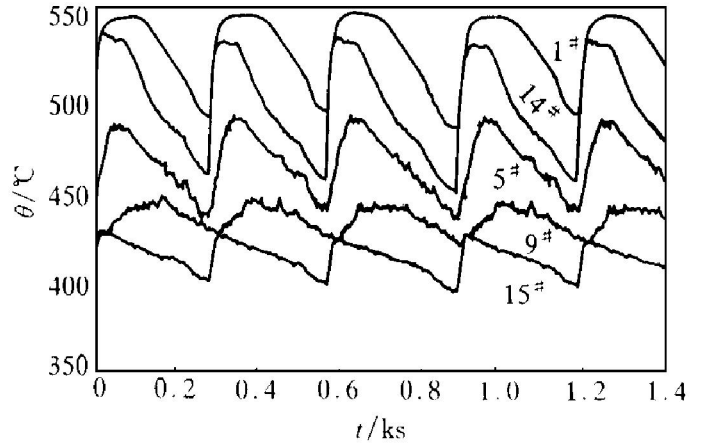


图3 实测记录的模具温度曲线

Fig.3 Practically measured temperature curves of die

1, 5, 9, 14, 15—Position of thermocouples

方程的离散采用有限差分法。模拟运算的基本过程如下:

①由动量方程(1)的显式差分格式,以初始条件或前一个时刻的值为基础,试算出当前时刻的初始猜测速度场;

②为了满足连续性方程(2),压力必须迭代修正。由此引起的速度改变加到上一步所计算的速度场上。反复迭代,直至满足迭代精度

要求。

③根据收敛的速度场进行体积率对流计算, 由体积函数方程(4) 设定新的流体表面移动前沿。

④根据新的边界条件以及体积率对流结果, 由能量方程(3) 计算铸件及模具的温度场。

充型模拟结束后得到铸件及模具的初始温度场。速度场和压力场迭代过程计算量大, 收敛困难, 是造成流场模拟计算时间长的主要原因。

72- 46 轮毂充型模拟结果如图4 所示。模拟结果表明, 轮毂充型过程平稳。金属液充填轮网的过程中未出现波动现象。在相应时刻的充型高度及状态与“中途卸压”试验结果比较接近, 说明采用层流模型进行低压铸造铝合金轮毂充型模拟是合适的。

3 凝固模拟

低压铸造凝固过程控制方程为

$$c_p = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{\rho} \text{div}(\lambda \text{grad}\theta) + S \quad (5)$$

凝固模拟通常不考虑金属液的流动, 因此式(5) 与式(3) 相比缺少了对流项。

为提高低压铸造模拟运算的精度及效率, 对以下方面进行了比较深入的研究。

3.1 边界条件

从图2 可见, 低压铸造模具边界条件比较复杂, 有多处冷却介质对模具进行强制冷却, 对流换热现象明显, 同时模具温度较高, 且各部分的温度相差较大。从前面的实测结果可见, 模具背面的温度可达 400 °C, 型腔表面温度超过 500 °C, 辐射强烈。因此, 在边界换热中考虑了对流与辐射。另外在生产过程中边界条件处在周期性变化之中, 需要在模拟中动态处理。

3.2 时间稳定性条件

对于有限差分显式算法, 由于计算稳定性的要求, 时间步长必须小于临界时间步长 Δt_c , 即取 $\Delta t = c_p \Delta t_c (c_0 < 1.0)$ 。 Δt_c 不仅取决于铸件与模具的材料特性、剖分的网格单元尺寸等因素, 还受到不同材料界面换热及边界换热的

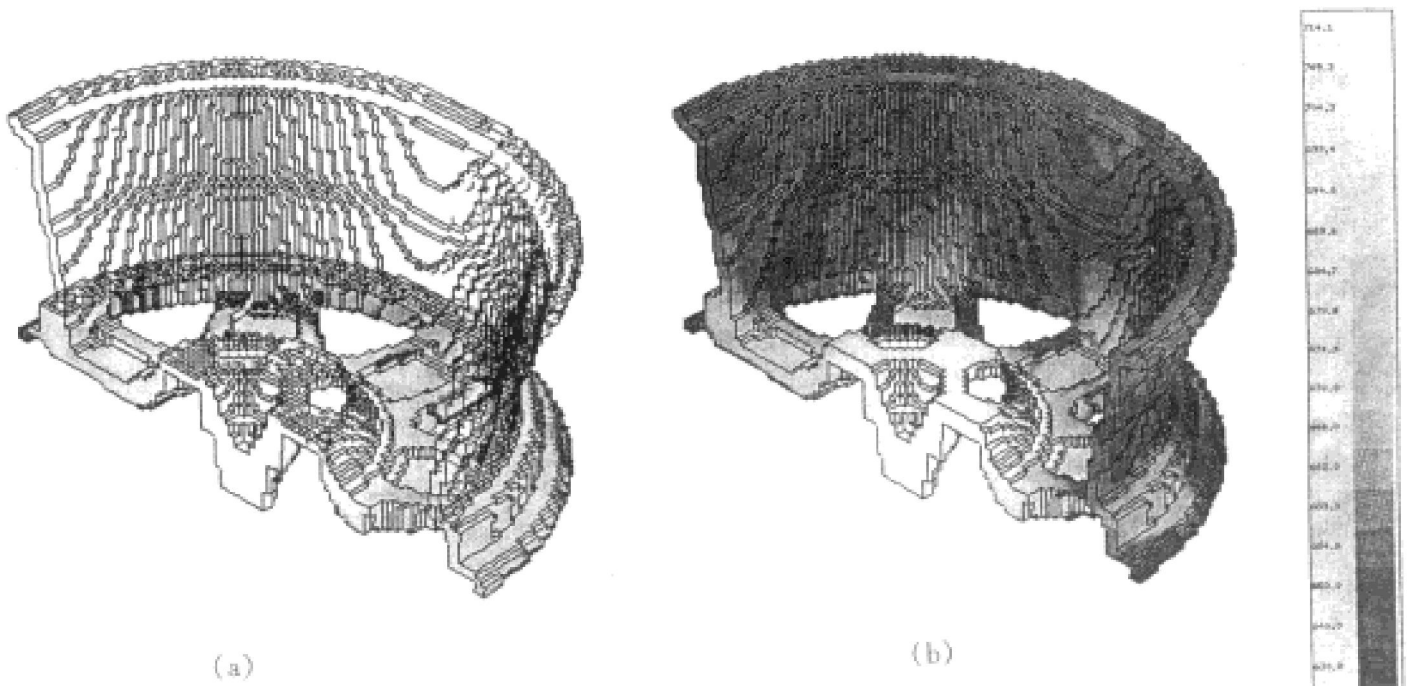


图4 72- 46 轮毂充型过程流场温度场(SOLA-VOF 算法)

Fig. 4 Temperature field of 72- 46 wheel during filling(SOLA-VOF algorithm)

(a) -3.00 s, 60.18%; (b) -5.09 s, 100%

影响。以边界条件分析为基础，对凝固模拟各阶段的时间步长进行准确计算，以避免计算过程的发散，同时缩短计算时间。

3.3 缩松判据

铝合金结晶温度较宽，缩松倾向较大。低压铸造可以使铸件在压力下凝固，有效地减轻缩松，但是现有的判据均未考虑压力的作用。宽结晶温度范围合金的补缩过程可以理解为金属液体在枝晶间流动。为此，采用描述金属液体在枝晶间流动的达西定律，考虑凝固收缩对枝晶间金属液体流动影响，推导出含压力项的缩松判据：

$$G_{sc} \sqrt{p_{sc}/R_{sc}} < K_c \tag{6}$$

式中 G_{sc} —对应于临界固相率的温度梯度； R_{sc} —对应于临界固相率的冷却速度； p_{sc} —对应于临界固相率的压力； R_{sc} —缩松判据临界值。

图5显示的是图2中各测温点冷却曲线的模拟结果。其中前3个循环未考虑充型(既假设瞬时充满)。对比图5与图3可见，各测温点的模拟结果与实测结果基本吻合，但15#曲线的模拟结果明显高于实测结果。15#测温点在轮网上缘附近(见图2)，而轮网上缘是轮毂的最后充填部位，金属液温度较低。不考虑充型对初始温度场的影响将造成模拟结果的偏差。图5中第4个循环考虑了充型，15#曲线明显降低。可见准确的凝固模拟必须考虑充型。

4 简化充型模拟

对72-46轮毂铸件的充型与凝固模拟分析表明，准确的凝固模拟必须考虑充型对初始温度场的影响。但基于SOLA-VOF算法的模拟运算时间长，给实际应用带来困难。为此针对轮毂铸件的充型特点进行了简化充型模拟研究。

根据轮毂铸件的充型特点(见图4)，可以将充型过程分解为图6所示的几个步骤：

(1) 金属液由浇口进入型腔，沿轴向上

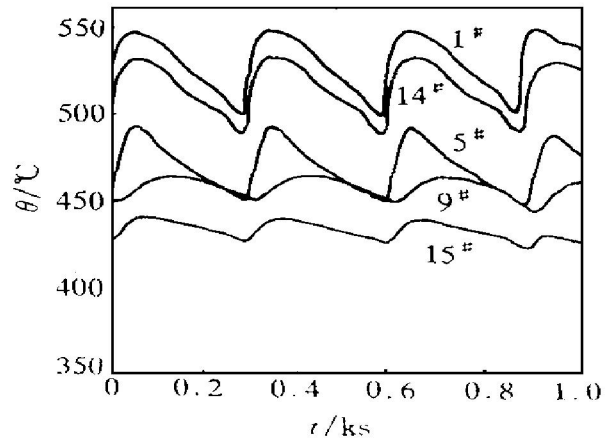


图5 模拟计算的模具温度曲线

Fig.5 Temperature curves of die through simulation calculation

1, 5, 9, 14, 15—Position of thermocouples

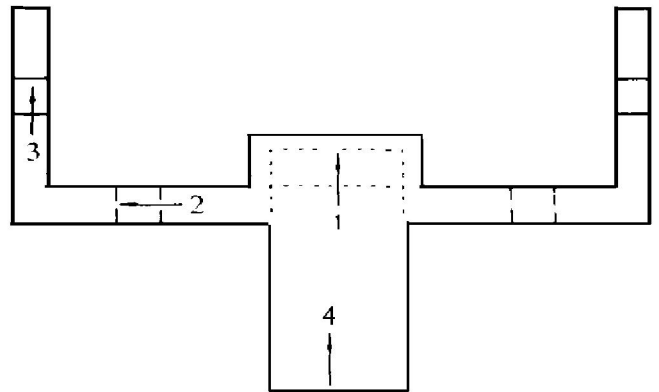


图6 简化充型模式示意图

Fig.6 Schematic diagram of simplified filling mode

- 1—Flowing direction of metal liquid front surface in stage 1;
- 2—Flowing direction of metal liquid front surface in stage 2;
- 3—Flowing direction of metal liquid front surface in stage 3;
- 4—Flowing direction of metal liquid at inlet

升；

(2) 金属液沿径向向四周扩展；

(3) 前两步达到基本稳定后，金属液在轮网底部铺展，并逐渐上升，直至充满型腔。

根据这一模式设计了逐层充填的简化充型模拟程序。

简化充型模拟不需要知道充填金属液的速度；

度场和压力场, 因此不再求解方程(1)及(2), 解决了充型模拟时间过长的问题。

用简化算法对 72-46 轮毂铸件进行了充型模拟, 图 7 为其模拟结果。对比图 7 与图 4 可见, 二者充型顺序基本一致, 充型状态相似, 充型结束后得到的铸件初始温度场基本一致。其中, 轮芯、轮辐及轮辐与轮网相交部位的温度场分布吻合得很好, 而轮网则有一定差别。这主要是由于逐层充填不能考虑微观流动, 造成轮网部位金属液的充填过程与实际情况不能很好吻合所致。由于在后续的凝固过程中轮网具有较快的凝固速度和较强的顺序凝固倾向^[4], 这里的误差对后续凝固不会产生明显的影响。由此可见, 以获得比较准确的初始温度场为目的的简化充型模拟, 针对低压铸造铝合金轮毂类铸件, 完全可以取代采用 SOLA-VOF 等算法的模拟程序。

与 SOLA-VOF 算法相比, 简化算法的最大优点是模拟时间短。而运算时间过长是目前流场模拟实际应用中的主要难题之一。以 72-

46 轮毂为例, 采用 SOLA-VOF 算法在 SGI Indigo2 工作站上需运算 1 周, 而简化算法则只需 1 h, 完全可以满足在实际应用中反复试算、反复调整的要求。

5 结束语

(1) 针对低压铸造铝合金轮毂铸件进行了温度场与流场的实验研究。

(2) 在实验研究的基础上, 对低压铸造充型与凝固模拟进行了研究, 开发出低压铸造充型与凝固过程模拟软件。对 72-46 轮毂的充型模拟分析与实验结果吻合。

(3) 根据轮毂类铸件的充型特点设计开发了一套简化充型模拟程序, 应用于铝合金轮毂铸件的充型模拟。模拟结果与采用 SOLA-VOF 算法的模拟结果基本吻合。简化算法可以在较短时间内获得铸件的初始温度场, 应用于后续的凝固模拟。

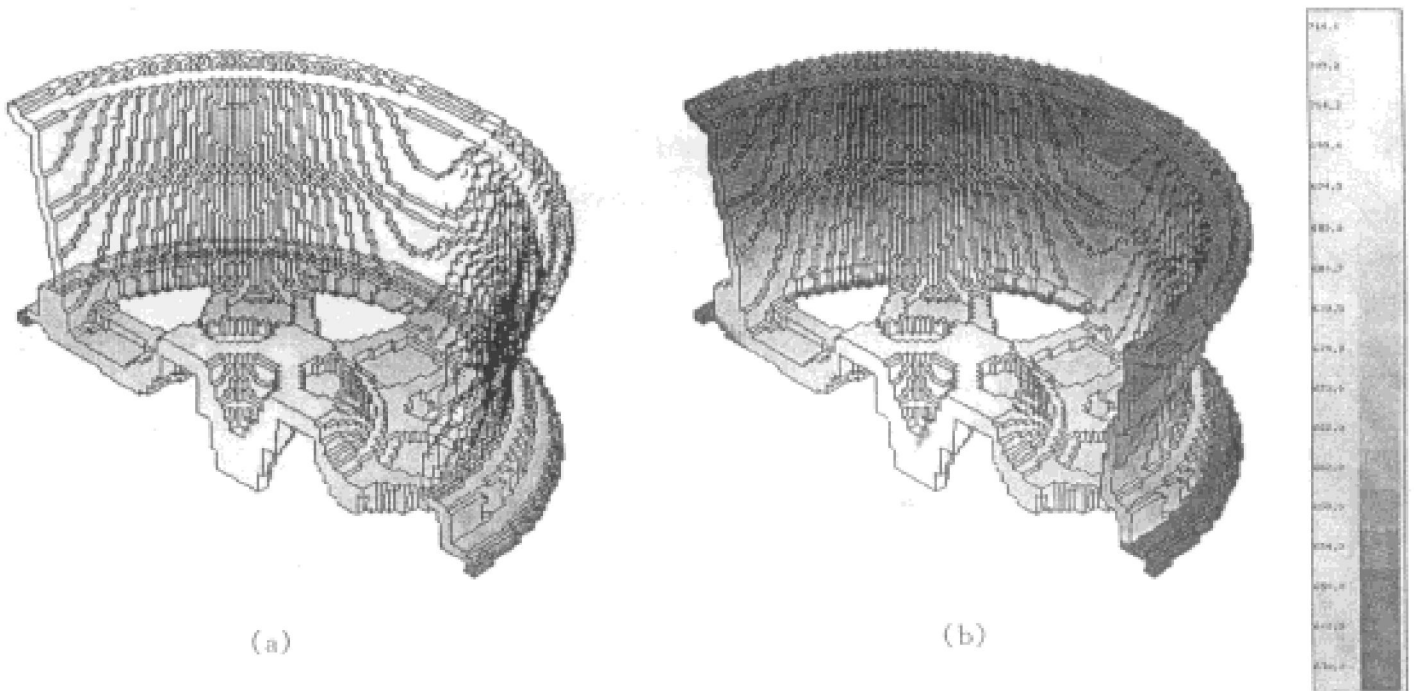


图 7 72-46 轮毂充型过程流场温度场显示(简化算法)

Fig. 7 Temperature field of 72-46 wheel during filling(simplified algorithm)

(a) -3.32 s, 61.61%; (b) -5.13 s, 100%

REFERENCES

- 1 Stoehr R A. Filling Control Modern Casting, 1989, (3): 30– 33.
- 2 Rigaut C. Hommes Et Fonderie, 1990, (10): 18– 23.
- 3 Wang Junqin(王君卿), Hansen S F and Hansen P N. Zhuzao(铸造), 1987, (12): 20– 22.
- 4 Wen Xinghuo(闻星火), Wang Xiaodong(王孝东), Liu Baicheng(柳百成) *et al.* China Foundry Machinery and Technology(中国铸造装备与技术), 1997, (4): 52– 54.
- 5 Wen Xinghuo(闻星火). PhD Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 1997.
- 6 Wen Xinghuo(闻星火), Wang Xiaodong(王孝东), Liu Baicheng(柳百成) *et al.* Special Casting and Nonferrous Alloys(特种铸造及有色合金), 1996, (4): 29– 32.

MOLD FILLING AND SOLIDIFICATION SIMULATION OF LOW PRESSURE DIE CASTING ALUMINUM WHEEL CASTING

Wen Xinghuo, Kang Jinwu, Xiong Shoumei and Liu Baicheng

Department of Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China

ABSTRACT Based on the temperature measurements and mold filling experiments, a mold filling simulation software of Low Pressure Die Casting (LPDC) was developed by using SOLA-VOF algorithm. Simulation analyses of 72– 46 aluminum wheel were conducted. The mold filling simulation results showed that it is necessary to proceed mold filling calculation at first and then solidification simulation since the temperature of liquid metal dropped greatly during mold filling. Based on the filling characteristics of LPDC wheel castings, a simplified mold filling simulation software was developed. The simulated initial temperature fields are in agreement with the simulated result by using the traditional SOLA-VOF algorithm. The main purpose of this software which is to provide a correct initial temperature distribution in the casting and the mold for the subsequent solidification simulation, was achieved.

Key words low pressure die casting mold filling simulation solidification simulation wheel casting

(编辑 黄劲松)