

# 铝合金轮毂半固态挤压铸造数值模拟

胡传林<sup>2,3</sup>, 杨湘杰<sup>1,2</sup>, 罗磊<sup>1,2</sup>, 余风利<sup>1,2</sup>

(1.南昌大学机电工程学院, 江西 南昌 330031; 2.江西省高性能精密成型重点实验室, 江西 南昌 330031;  
3. 南昌大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330031)

**摘要:** 采用铸造模拟软件 Anycasting 对 A356 铝合金轮毂零件的进行了挤压铸造充型过程和凝固过程的数值模拟。通过分析缺陷情况, 对工艺参数进行了优化, 并进行了压铸实验验证。模拟结果表明, 在模具温度 200℃, 浇注温度 600℃, 压射速度 0.30m/s 条件下, 能够获得最佳质量的轮毂铸件。

**关键词:** 半固态; 挤压铸造; 铝合金轮毂; 数值模拟

## Numerical Simulation of Semi-solid Squeeze Casting for Aluminum alloy wheel hub

HU Chuanlin<sup>2, 3</sup>, YANG Xiangjie<sup>1, 2</sup>, LUO Lei, <sup>1,2</sup>, YU Fengli<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Jiangxi Provincial key laboratory of high performance precision molding, Nanchang 330031, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** The filling and solidification processes of A356 aluminum alloy wheel hub by squeeze casting were simulated with Anycasting the casting numerical software. Through analyzing the defects, the process parameters were optimized and verified by squeeze casting trials. The results show that the best quality of wheel hub castings can be obtained under conditions of mold temperature 200℃, pouring temperature 600℃ and squeezing speed 0.30 m/s.

**Key words:** semi-solid; squeeze casting; aluminum alloy wheel hub; numerical simulation

轮毂是车辆承载的重要安全部件,其除了受车体自身重力外,还受到因车辆起动、制动时的扭矩作用,以及车辆在行驶过程中转弯、冲击等多方向的不规则受力。作为高速旋转的车轮,还影响整车的平稳性、操纵性、舒适性等性能<sup>[1]</sup>。长期以来,钢制轮毂在轮毂中占主导地位,但随着科学技术的发展,人们对车辆安全、环保、节能的要求日趋严格,铝合金轮毂以其质轻、节能、美观、散热好、耐腐蚀、加工性好等特点,正逐步取代钢制轮毂成为最佳选择<sup>[2]</sup>。

目前铝合金轮毂生产工艺主要采用低压铸造,成本低,但铸件性能低。而采用模锻工艺生产的产品,虽然性能高、质量轻,但生产流程长,效率低,制造成本很高,限制了其应用范围,也减弱了其市场竞争力。半固态挤压铸造工艺生产铝合金轮毂能有机地将半固态加工和挤压铸造相结合,利用半固态浆料的流变特性进行充型并在压力下凝固,可以使轮毂铸件晶粒细化,组织致密,外观光洁,提高其力学性能和表面质量。而且半固态挤压铸造成形技术作为一种近终成形技术,轻量化效果优于普通铸件,而生产成本低于普通锻件。因此该技术获得了广泛关注和青睐,有望成为生产汽车轮毂的重要技术手段<sup>[3-5]</sup>。

随着计算机技术的快速发展,计算材料科学已成为一门新兴的交叉学科,是除试验和理论外解决材料科学实际问题的第三个重要研究方法。它可以比理论和试验做得更深刻、更细致,可以进行一些理论和试验暂时还做不到的研究。根据美国科学研究院工程技术委员会的测算,模拟可增加材料出品率 25%、提高产品质量 5~15 倍、降低工程技术成本 13%~30%、降低人工成本 5%~20%、增加投入设备利用率 30%~60%、缩短产品设计和试制周期 30%~60%等<sup>[6-9]</sup>。

本文利用数值模拟软件 Anycasting 分析轮毂半固态挤压铸造充型和凝固过程,分析缺陷出现的

情况, 实施相应工艺参数优化, 从而提高铸件质量, 减少铸件生产工艺的试验次数及缩短铸件生产周期, 提高生产效率, 指导实际生产。

## 1 模拟实验

### 1.1 数学模型的建立

模拟实验采用铸造专用软件 AnyCasting, A356 合金半固态浆料作如下假设<sup>[10-11]</sup>:

(1) 半固态金属浆料视为连续的、不可压缩的金属流体, 其流动特性由表观粘度来表征, 在模拟过程中流体模型采用 Bingham 模型, 即:

$$\begin{cases} \eta = 0 & \tau < \tau_r \\ \eta = \eta_0 + \frac{\tau_r}{D} & \tau \geq \tau_r \end{cases}$$

式中:  $\tau_r$  为屈服应力(N/m<sup>2</sup>);  $\eta_0$  为粘度。仅当材料所受剪应力超过屈服应力时才会流动, 而小于屈服应力时材料具有弹性固体的行为, 忽略时间对半固态浆料粘度的影响。

(2) 半固态浆料的均匀性在半固态金属中有一定数量(40%~60%)的固相颗粒, 但颗粒的直径较小(<100  $\mu\text{m}$ ), 且固相颗粒均匀地分布在液相中。固、液两相密度相近, 在成形过程中变形量很大, 因此在模拟过程中将半固态坯料视为均匀介质。

除了采用上述所说的粘度模型以外, 半固态合金浆料的充填模拟还需要采用其他模型, 主要包括: 质量守恒方程、运动守恒方程、能量守恒方程和体积函数方程。其控制方程如下:  
连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

体积函数方程:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

能量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right] + S_R \end{aligned} \quad (3)$$

Navier-Stokes 运动方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u v) &= \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v v) &= \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho\omega v) = \text{div}(\mu \text{grad}\omega) - \frac{\partial\rho}{\partial x} + S_\omega$$

式(1)~(4)中:  $\rho$  为密度;  $t$  为时间;  $\mu$  为速度矢量;  $u$ 、 $v$  和  $\omega$  为速度矢量  $\mu$  在  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向的分量;  $S_u$ 、 $S_v$  和  $S_\omega$  为动量守恒方程的广义源项;  $C_p$  为比热容;  $T$  为温度;  $k$  为流体的传热系数;  $S_T$  为流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分, 也简称粘性耗散项;  $F$  为流体体积分。

### 1.2 铸件模拟模型

采用 proe4.0 软件建立铝合金轮毂及浇注系统三维模型, 见图 1。该铸件由溢流槽、轮毂及浇道组成。最小处为 2mm, 浇道尺寸为 40mm×30mm, 三维建模完成后用 STL 格式导出。

### 1.3 模拟参数设置

将格式转换后的 STL 文件导入到 Anycasting 前处理模块中处理。为了更真实的模拟整个挤压铸造过程, 根据轮毂的几何结构特点, 在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向划分成尺寸不一的网格, 整个铸件模拟模型共划分为 1723960 个网格单元, 电机鼠笼转子最薄的地方需保证至少 3 层网格, 主要是为了保证模拟的准确性, 见图 2。

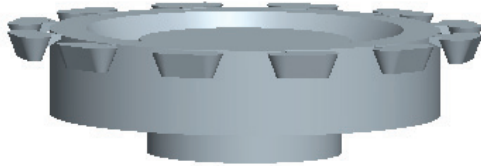


图 1 轮毂浇注系统几何模型

Fig.1 Geometric model of gatingsystem of wheel hub

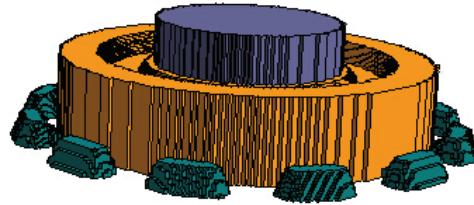


图 2 轮毂铸件网格模型

Fig.2 Mesh model of wheel hub

铸件材料为铝合金 A356, 其化学成分见表 1, 液相线和固相线温度分别为 615℃、573℃。该铝合金具有较宽的半固态温度区间, 易于控制和操作, 适合半固态浆料的制备和流变成形。

表 1 试验用 A356 合金的化学成分

| Table1 Chemical composition of A356 alloy for testing |      |      |     |    | (w <sub>B</sub> %) |
|-------------------------------------------------------|------|------|-----|----|--------------------|
| Si                                                    | Mg   | Fe   | Cu  | Al |                    |
| 7.49                                                  | 0.46 | 0.16 | 0.2 | 其余 |                    |

模具材料为 H13 钢, 模拟用材料的物理参数见表 2。挤压冲头直径 60mm, 模具的预热温度为 220℃, 模具与铸件的热传导系数为 1000W/(m<sup>2</sup>·℃), 空气与模具、空气与铸件的热传导系数均为 41.87W/(m<sup>2</sup>·℃), 动模和定模的热传导系数为 2000W/(m<sup>2</sup>·℃), 重力加速度为 980cm/s<sup>2</sup>。

表 2 A356 铝合金和 H13 钢的物理参数

| Table 2 Physical parameters of A356 alloy and H13 steel |                             |                                                |         |         |                              |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|---------|---------|------------------------------|
| 材料                                                      | 密度<br>(g.mm <sup>-3</sup> ) | 比热容<br>(kJ.kg <sup>-1</sup> .℃ <sup>-1</sup> ) | 液相线温度/℃ | 固相线温度/℃ | 潜热<br>(kJ.kg <sup>-1</sup> ) |
| A356                                                    | 2.685                       | 0.963                                          | 615     | 573     | 389                          |
| H13                                                     | 7.367                       | 0.7262                                         | 1471    | 1403    | 28.07                        |

运用超松弛迭代的方式在运算器中计算步长, 最终计算出半固态浆料充型、凝固过程的各种矢量场。

## 2 数值模拟结果及分析

### 2.1 不同浇注温度下模拟结果的分析

浇注温度对充型过程的影响很大,当浇注温度高时,金属液的流动性好,易于充型和补缩。选取浇注温度分别为  $590^{\circ}\text{C}$ 、 $600^{\circ}\text{C}$ 、 $610^{\circ}\text{C}$ ,模具预热温度为  $200^{\circ}\text{C}$ ,浇注速度为  $0.3\text{ m/s}$ ,分析 A356 铝合金的合理浇注温度。在三种温度条件轮毂铸件均可完成充型,故选取固相率 70%时铸件的充型率为参考。当浇注温度为  $590^{\circ}\text{C}$ 时,充型未完成,即固相率较高时流动性较差,未完全充型,见图 3a。当浇注温度为  $600^{\circ}\text{C}$ 时,铸件充型率可达到 100%,从宏观上观察模拟的结果,可以得到在  $600^{\circ}\text{C}$ 时充型流动比较平稳,流动前沿呈现固态金属的流动前沿状态,流动自由表面光滑,没有飞溅,大大减少了卷气的发生,铸件的致密性有较大提高<sup>[12]</sup>,见图 3b。当浇注温度为  $610^{\circ}\text{C}$ 时,铸件充型率也可达到 100%,见图 3c。因此,要保证轮毂铸件充型完整和铸件质量浇注温度应该 $\geq 600^{\circ}\text{C}$ 。温度升高有利于充型完整,但是金属液的温度不是越高越好,因为浇注温度太高时,凝固收缩太大,缩孔、缩松形成趋势将增加,铸件尺寸精度降低<sup>[13]</sup>,因此确定合理的浇注温度为  $600^{\circ}\text{C}$ 。

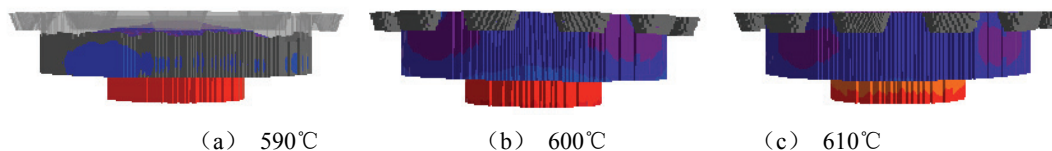


图3 不同浇注温度下 A356 铝合金轮毂充型率

Fig.3 Filling rate of wheel hub of A356 alloy with different pouring temperature

### 2.2 不同的压射速度下模拟结果的分析

选用合适的压射速度,不仅可以避免卷气,而且能改善半固态挤压模的排气状况,同时使得浆料流动平稳和热传递均匀<sup>[11]</sup>。在模拟中选取压射速度分别为  $0.15\text{ m/s}$ 、 $0.30\text{ m/s}$ 、 $0.45\text{ m/s}$ ,经过分析模拟结果可知, A356 铝合金浇注温度在  $600^{\circ}\text{C}$ 时模拟充型效果最佳。因此,选取浇注温度为  $600^{\circ}\text{C}$ 。模拟浇注温度为  $600^{\circ}\text{C}$ 时,压射速度对 A356 铝合金轮毂充型凝固过程及缩孔、缩松等缺陷形成趋势的影响,见图 4。在挤压浇注过程中,当压射速度较小时,金属液温度降低,不能进行很好的热传导。由于存在温度梯度,凝固时补缩不好,导致铸件上端环内部产生缩孔、缩松等缺陷,见图 4c。随着压射速度的增加,充型时间和凝固时间缩短,所以轮毂铸件更容易充型完整,但是压射速度过大会产生卷气,导致铸件上端环内部出现缩孔、缩松等缺陷,见图 4i;另外压射速度过大也会对模具产生较大的冲击力,缩短模具使用寿命。压射速度为  $0.3\text{ m/s}$  时,凝固过程用 3 个有代表性的测试点的温度曲线来记录,如图 5 所示。可见铸件臂凝固较快,铸件中心凝固较慢。从图 4e 可以看出最后凝固的部分在浇道位置,铸件凝固过程接近顺序凝固,保证了凝固过程中有足够的金属液进行补缩和铸件在压力下凝固,得到无缩孔、缩松等缺陷的合格铸件(图 4f),虽然此时在溢流槽上也出现缩孔、缩松等缺陷,但溢流槽属于附件需去除,因此确定合理的压射速度为  $0.3\text{ m/s}$ 。

综合上面的模拟结果分析,可以得出:模具温度为  $200^{\circ}\text{C}$ ,浇注温度为  $600^{\circ}\text{C}$ ,压射速度为  $0.3\text{ m/s}$  是最优工艺参数。采用文献<sup>[14]</sup>的研究成果制备半固态浆料,并进行半固态挤压铸造实验。

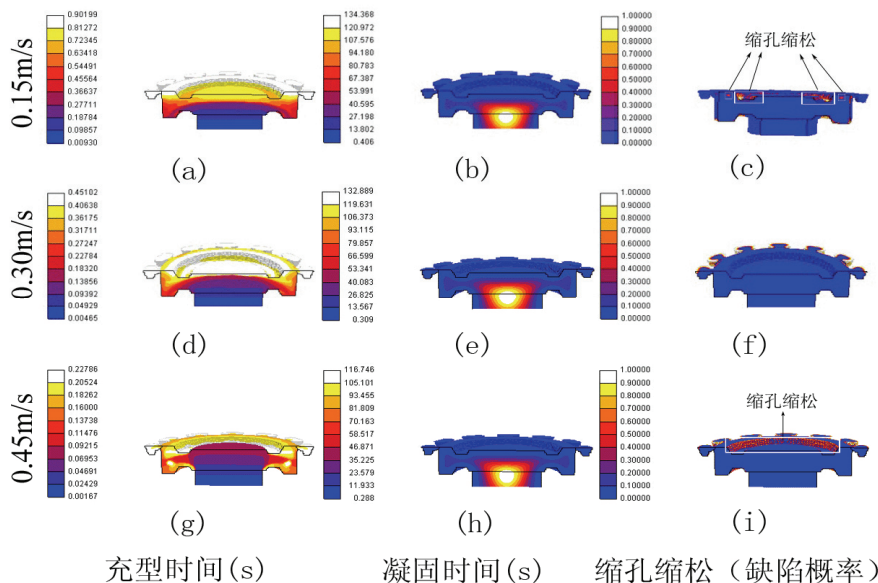


图4 浇注速度对 A356 铝合金轮毂铸件凝固特性的影响

Fig.4 Influence of pouring velocity on solidification characteristics of wheel hub of A356 alloy

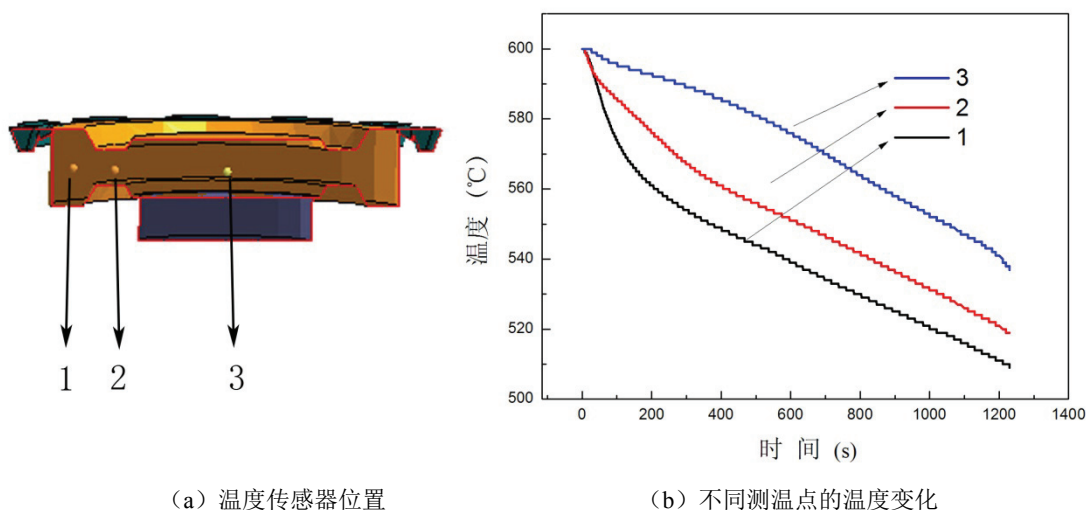


图5 0.3m/s 时凝固过程中各个测试点温度变化曲线

Fig.5 Temperature change curve of each test at 0.3m/s

### 3 半固态挤压铸造实验验证

按照模拟分析结果得出的最优工艺参数, 进行实验, 获得了整体质量很好的铸件。铝合金轮毂件充型完整, 表面无针孔、裂纹等缺陷。轮毂的横切面宏观组织致密, 无缩孔缩松和气孔等缺陷。对试验铸件的主要部位做剖切之后, 在金相显微镜下观察, 由于在半固态挤压成形中, 浆料在挤压压力的作用下凝固, 使铸件的致密度进一步提高, 原始枝晶形貌已经看不出来, 不同区域微观组织见图6。

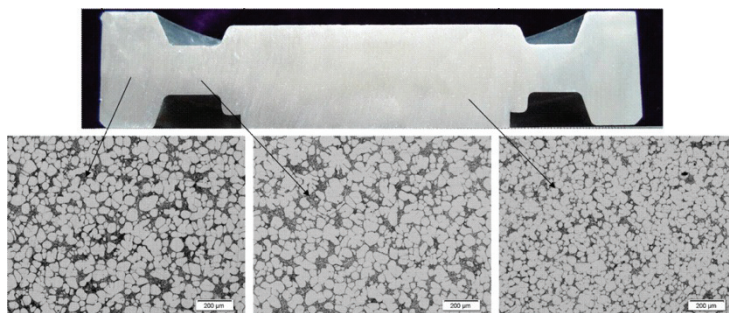


图 6 优化后的工艺参数实验样件

Fig.6 Experimental sample after optimization of process parameters

## 4 结论

(1) 浇注温度为  $600^{\circ}\text{C}$  时, A356 铝合金挤压充型过程要比  $590^{\circ}\text{C}$  和  $610^{\circ}\text{C}$  充型平稳, 轮毂铸件不易产生缩孔、缩松等缺陷。

(2) 通过分析数值模拟结果和试制实验获得了最优的工艺参数: 模具预热温度  $200^{\circ}\text{C}$ , 浇注充型温度  $600^{\circ}\text{C}$ , 压射速度  $0.30\text{m/s}$ 。

### 参考文献:

- [1] 王祝堂. 试论我国汽车铝合金轮毂工业的发展[J]. 铝加工技术, 1994(1):7-13.
- [2] 王昕. 铝合金汽车轮毂的生产方法[J]. 轻合金加工技术, 2001(8):38-42.
- [3] 罗守靖. 钢质液态模锻[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.
- [4] 罗守靖, 陈炳光, 齐丕骧. 液态模锻与挤压铸造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] 洪慎章, 曾振鹏. 半固态挤压铸造工艺、材料及应用[J]. 汽车工艺与材料, 2001(9): 13-16.
- [6] 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.
- [7] 柳百成, 许庆彦, 熊守美, 等. 铸造过程的多尺度模拟研究进展[J]. 机械工程学报, 2003, (10):53-63.
- [8] National Research Council. Visionary manufacturing challenges for 2010 [M]. USA: National Academy press, 1998.
- [9] Kato K. Current situation and the challenges facing the automobile casting industry in Japan[M]. Korea: Technical forum for the 65th World Foundry Congress, 2002.
- [10] 崔成林, 北京科技大学学报 [J], 2001, (22)3:237.
- [11] 杨卯生, 徐宏, 毛卫民, 等. 铝合金半固态触变充型过程的计算机模拟 [J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(2): 181-185.
- [12] 毛卫民. 半固态金属成形技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [13] 骆良顺, 冯明, 苏颜庆, 等. TiAl 基合金连杆件底漏式真空吸铸数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(1):42-45.
- [14] Guo H M, Yang X J, Wang J X. Pressurized solidification of semi-solid aluminum die casting alloy A356 [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 485: 812-816.