

铸造镁合金机匣凝固过程缩孔缩松形成的数值模拟

陈丹, 康福伟, 刘东戎, 郭二军, 王丽萍

(哈尔滨理工大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 本文根据砂型铸造凝固原理, 利用 AnyCasting 软件对 ZM5 合金机匣砂型铸造凝固过程进行数值模拟研究。基础是 ZM5 机匣的三维实体造型, 设计出造型后, 将造型导入 AnyCasting 软件, 利用软件的网格划分功能对机匣进行网格划分, 完成铸造分析模型的模型化。然后确定铸造工艺参数, 进行浇注试验, 对凝固过程进行模拟, 并对缺陷进行预测和分析, 完成最终工艺优化的目的。模拟结果表明: 当浇注温度为 750℃, 冷铁材料为铸铁时, 镁合金机匣在凝固过程薄壁部位很容易产生宏观缩孔、缩松等缺陷; 当浇注温度减低为 690℃, 冷铁材料为铜合金后, 镁合金机匣的薄壁处缺陷倾向明显降低, 甚至消除。从而得出合理的铸造工艺, 用于生产, 提高铸件的出品率。

关键词: 铸造镁合金; AnyCasting; 凝固过程; 缩孔缩松

中图分类号: TG244

Numerical Simulation of Shrinkage Porosity Formation of Cast Magnesium Alloy Casing in Solidification Process

Chen Dan, Kang Fuwei, Liu Dongrong, Guo Erjun, Wang Liping

(School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040)

Abstract: According to the sand casting solidification principle, using AnyCasting software to study ZM5 alloy solidification process of sand casting numerical simulation. ZM5 machine is based on the three-dimensional modelling. After the design model, importing the model into AnyCasting software, using the meshing function of software to finish casting for grid, and the casting model is completed. Then, we determine the casting process parameters of casting, fill the mold, simulate the solidification process, forecast and analysis of defects, complete the ultimate goal of process optimization. The simulation results show that when pouring temperature is 750 degrees Celsius and material of chill is iron, solidification process of magnesium alloy thin-walled parts is easy produce macro shrinkage or shrinkage defect, etc. When filling temperature is down to 690 degrees Celsius and materials of chill is copper alloy, the defects of thin-walled magnesium alloy casing tend to significantly lower, or even disappearing. Thus reasonable casting process for production will improve product rate of castings.

Keywords: cast magnesium alloy; AnyCasting; solidification process; shrinkage porosity

0 引言

航空镁合金铸件的结构复杂, 铸造缺陷较多, 且难克服, 尤其是代表性的某型航空机匣壳体铸件。航空机匣壳体铸件是国内最难生产的镁合金铸件, 为浇注该铸件共准备了数套各式模具及数套测具, 数件冷铁, 该铸件从制芯到浇注的周期为数天, 由于准备周期长, 砂芯吸湿严重, 给浇注成型带来了极大的困难, 其熔化重量达几吨, 浇铸重量为数百公斤。常见的各种铸造缺陷在该铸件上几乎都出现过。在研制壳体类铸件过程中铸件存在缩孔、憋气、铸造裂纹、氧化夹杂、熔剂夹杂、重金属偏析及反应性夹砂等铸造缺陷[1]。因其工艺复杂, 所以采用计算机数值模拟进行工艺的改良, 提高工艺出品率。

作者简介: 陈丹 (1985-), 女, 学生, . E-mail: chendan_1788@126.com

鉴于以上原因, 本文采用 AnyCasting 软件对镁合金机匣凝固过程进行模拟, 并对合金铸件宏观缩孔缩松进行了预测, 并探讨对其改进工艺, 从而用于生产。

1 模拟计算数学模型建立

高温金属液为粘性不可压缩流体, 充型过程连续平稳。液态金属充填铸型过程数值模拟是以动量守恒方程和质量守恒方程为基础的[2]。质量守恒方程:

$$D = \frac{\partial u}{\partial v} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_y + \mu \nabla^2 v \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_z + \mu \nabla^2 w \quad (4)$$

式中: u 、 v 、 w 分别表示速度矢量在 x 、 y 、 z 方向上的分量; ρ 是单位密度的压力; g_x 、 g_y 、 g_z 为重力加速度分量; μ 为运动粘度; ∇^2 为拉普拉斯算子。

铸件凝固传热基本规律可通过傅立叶导热微分方程来描述[3]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (5)$$

式中: c_p 为定压比热容, 单位 $J/kg \cdot ^\circ C$; λ 为热导率, 单位 $W/m \cdot ^\circ C$; Q 为热源项, 单位 J 。

2 模拟前处理

2.1 铸造镁合金机匣铸件特点

航空铸造镁合金机匣铸件的结构复杂, 要求有高的尺寸精度和冶金质量。所以铸造工艺图也比较复杂, 图 1 为铸造镁合金机匣三维实体模型。为了保证质量, 机匣铸件上有冷铁, 见图 2。

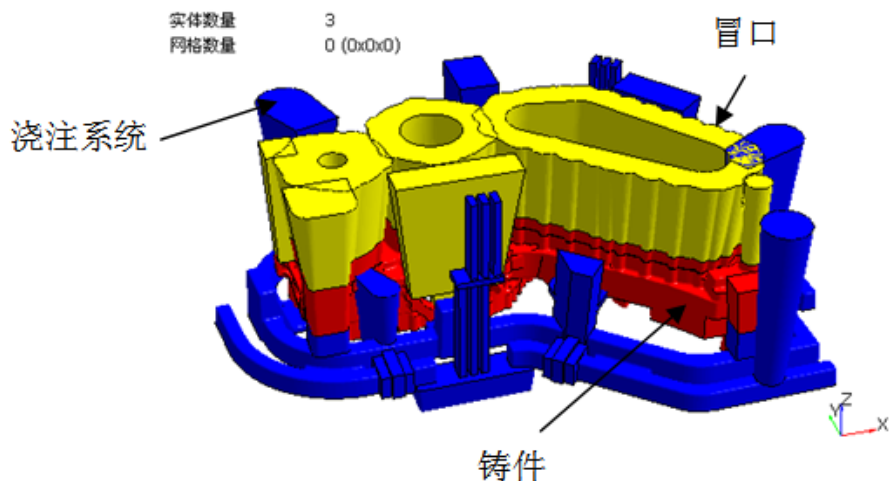


图 1 铸造镁合金机匣三维实体模型

Fig.1 Three-dimensional solid model of cast magnesium alloy casing

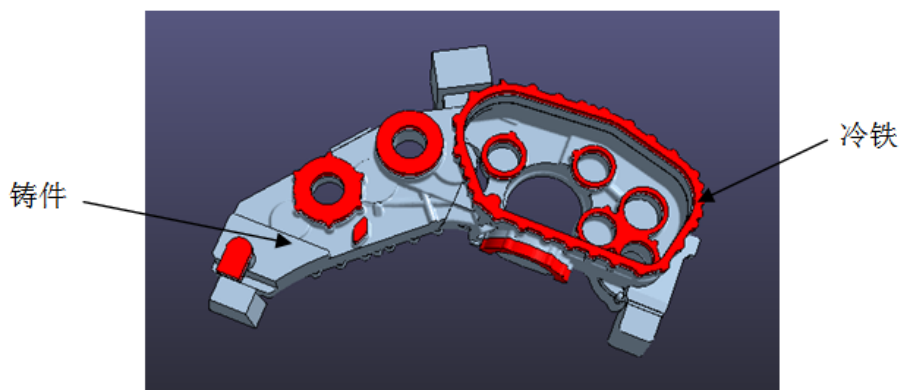


图 2 添加冷铁的工艺图

Fig.2 Technology drawings of adding the chill

2.2 模拟过程中网格剖分及铸造工艺参数的选择

2.2.1 铸造镁合金机匣铸件的网格剖分

为了进行浇注模型仿真实验,分析研究现行铸造工艺方案和铸造工艺参数的合理性,需要对铸造仿真模型进行有限差分网格的划分。实验的目的决定了网格划分后的模型要尽量逼近于实际模型。才能确保实验分析实验结果的正确性,保证对现行铸造工艺方案作出较为准确的评价。这样就可以保证在计算结果中具有足够精度的前提下,减少计算时间,提高效率,在有限的时间和硬件条件下获得较为满意的计算结果。按照以上网格划分的设计思想,将网格的划分参数设定所得结果见表 1 所示:

表 1 铸造镁合金机匣铸件自动网格剖分设置
Tab.1 Uniform mesh generation of cast magnesium alloy casing

类型	值
网格大小 (dx)	6
网格大小 (dy)	6
网格大小 (dz)	6
表面单元	305156
所有网格	2556720

2.2.2 铸造工艺参数设定

网格划分完毕后, 需要输入铸造镁合金匣铸件的铸造工艺参数, 铸件的材料设定见表 2。

在砂型或有冷铁存在的铸造条件下, 随着铸件的凝固收缩以及铸型的受热膨胀, 在铸件和铸型界面上会产生一个气隙^[4]。它改变了界面处的传热方式, 增加了界面热阻, 并使界面传热量发生变化。冷铁热物性参数见表 3。在这一过程中, 界面上的热交换情况根据实际情况进行选择, 界面的热交换系数一般表示为时间的函数^[5]。

AnyCasting 界面换热条件有自己的数据库, 可以根据材料的属性查到对应的界面换热条件的各种参数。铸件与砂型、浇注系统与砂型之间的界面换热根据实际进行具体选择。

表 2 铸件的材料定义
Tab.2 Definition of the casting material

材料	铸造镁合金			型砂
	ZM5 (相当于美国牌号 AZ81A)			树脂砂
铸造温度 (°C)	初始温度	液相线临近温度	固相线临近温度	初始温度
	750	610	490	25

表 3 冷铁的热物性参数
Tab.3 Thermal parameters of chill

材料	铸铁
初始温度 (°C)	25
导热系数 W/(m · °C)	52

铸件的工艺方案如下表 4 所示

表 4 铸件的工艺方案
Tab.4 Technical program of casting

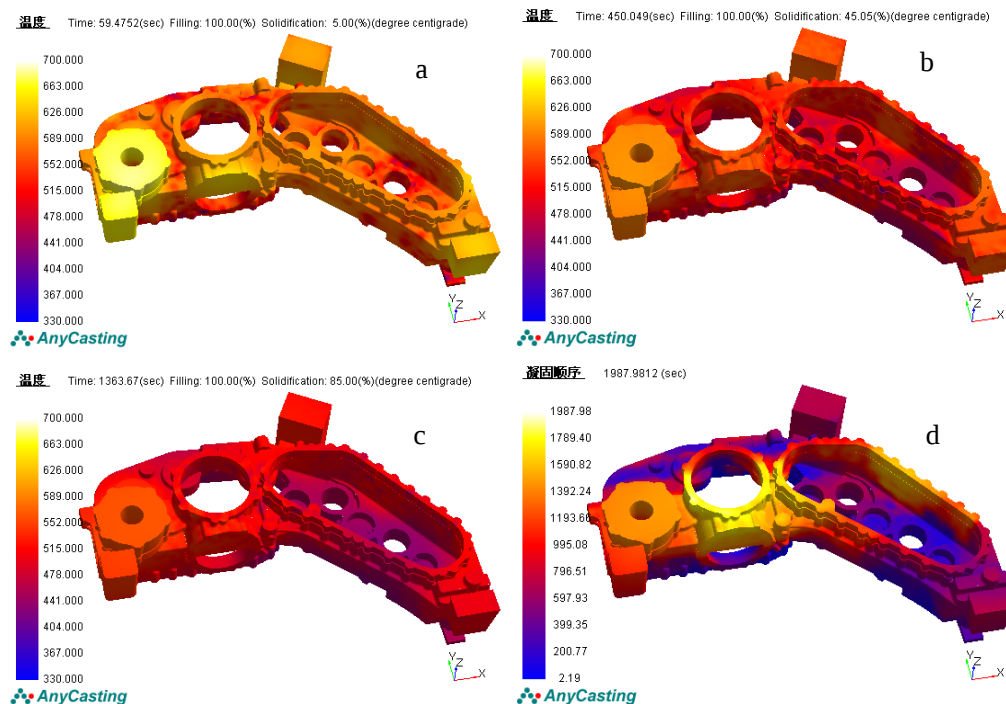
浇注温度 (°C)	充型速度 (m/s)	浇铸时间 (s)
750	2.5	4

3 机匣铸造工艺方案的模拟结果及缺陷分析

3.1 凝固过程结果分析

为了预测铸件凝固过程有可能出现的铸造缺陷如缩松、缩孔、冷隔、热裂、气孔等, 以便在优化铸造工艺中采取相应措施避免这些缺陷的产生, 就必须对铸件的凝固顺序做出预测。

影响砂型铸造镁合金机匣铸件组织形成的主要因素有浇注温度、浇注速度、注口选择等主要条件、液体流动性以及合金的凝固温度范围等。一些薄壁铸件, 在充型阶段就有可能发生凝固现象^[6]。图 3 是铸件的凝固情况, 机匣铸件达到完全凝固时所需要的时间为 1460s, 凝固时间较长, 凝固速度较慢。开始凝固时凝固速度较快, 随后凝固速度减小, 到最后凝固速度越来越小。观察模拟结果, 发现凝固过程中存在孤立液相区, 在铸件的一些薄壁的地方形成热节, 阻断了冒口对此处的补缩作用, 而且冷铁的导热速率不够大, 从而破坏了铸件的顺序凝固, 最终导致铸件的一些部位产生收缩缺陷。



a 凝固 5%; b 凝固 45%; c 凝固 85%; d 凝固 100%

图 3 铸造镁合金机匣的凝固顺序及温度分布

Fig.3 Solidification sequence and temperature distribution of cast magnesium alloy casing

3.2 铸造缺陷模拟结果分析

由凝固过程分析可知,在凝固过程中,机匣铸件薄壁区域很容易产生缺陷,本文用概率缺陷参数来反映铸件是否产生缺陷。在铸件表面产生缺陷的区域不明显,所以采用剖面结果进行分析。分析结果表明:在铸件薄壁区域产生缺陷的概率比较大如图 4 所示。

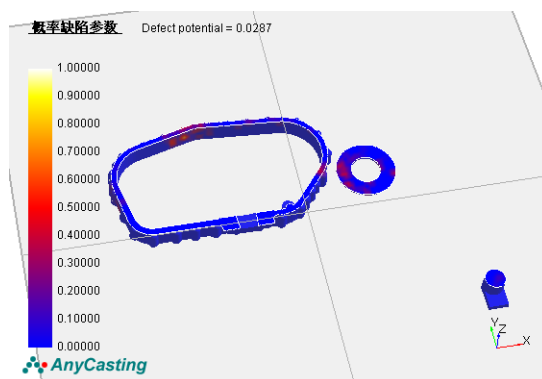


图 4 机匣可能产生收缩缺陷的位置和大小

Fig.4 Possible location and size of shrinkage defects

4 改进方案及实际效果分析

由于铸件的结构、壁厚、尺寸以及材质等多因素的影响,铸造过程中容易形成热节,热节的形成是由于铸件局部散热不良所致。它的存在破坏了铸件的热平衡状态和整体冷却的平衡性,也破坏了铸件的顺序凝固,不利于铸件的整体性能。这就需要对铸件局部采取冷却或保温措施,以保铸件的顺序凝固。如果浇注温度过低,可能引起局部浇不足、冷隔、夹杂等缺陷;如浇注温度过高可能引起缩孔、缩松、气孔及晶粒粗大等缺陷^[7],因此将浇注温度设

置为 690°C 。冷铁的蓄热系数表示冷铁从相邻的金属吸取热量并储存在自身的能力，当冷铁的热导率越大，即蓄热系数越大，冷铁的激冷能力就越强。因此，采用导热率高的冷铁（铜合金冷铁）、降低浇注温度的工艺措施，有利于由下到上的顺序凝固。浇注方案及冷铁的热物性参数见表 5 和表 6。

表 5 铸件工艺改进方案
Tab.5 Casting process improvement program

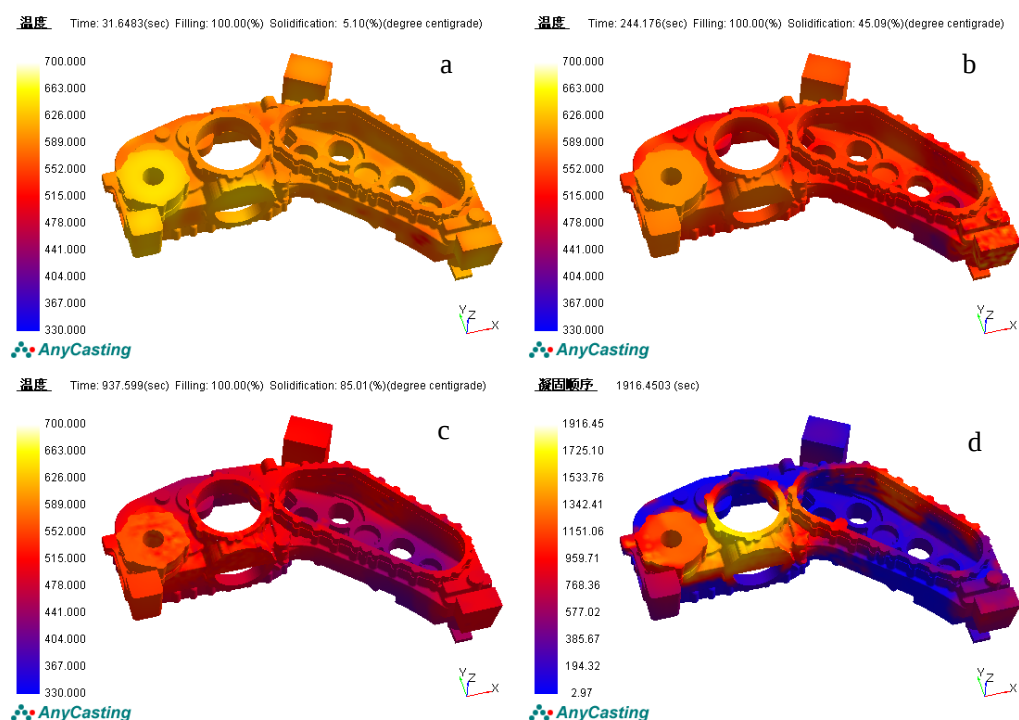
浇注温度 ($^{\circ}\text{C}$)	充型速度 (m/s)	浇铸时间 (s)
690	2.5	4

表 6 改进方案冷铁的热物性参数
Tab.6 Improved thermal parameters of improved chill

材料	黄铜
初始温度 ($^{\circ}\text{C}$)	25
导热系数 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$	88

4.1 改进方案后凝固过程结果分析

图 5 为采用导热率高的冷铁+降低浇注温度后计算得到的凝固过程示意图。从图中可以看到，冷铁的作用使热节按照正确的凝固路线凝固，使孤立液相区明显减少，从而使该处避免了收缩缺陷的产生。由于铜合金的蓄热和导热能力远远大于铸铁材料，有效地使铸件快速散热和凝固，而且由于浇注温度的降低，使得铸件产生缩孔缩松的倾向减小，更好地保证了铸件顺序凝固。



a 凝固 5%; b 凝固 45%; c 凝固 85%; d 凝固 100%

图 5 改进方案后铸造镁合金机匣的凝固顺序及温度分布

Fig.5 Solidification sequence and temperature distribution of improved cast magnesium alloy casing

4.2 改进方案后铸造缺陷分析

机匣在凝固过程中由于冷铁的作用加强以及浇注温度的降低，铸件薄壁区易产生缺陷的

倾向减小, 所以逐渐缺陷已基本消除见图 6。

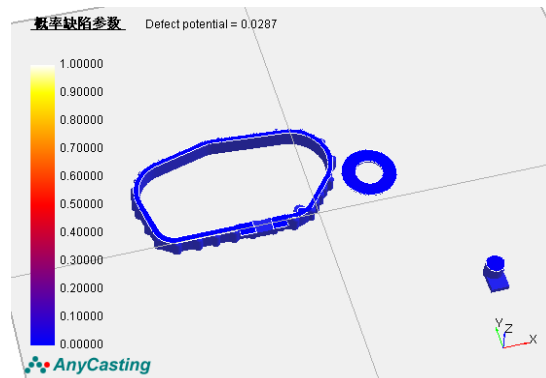


图 6 改进方案后机匣可能产生收缩缺陷的位置和大小
Fig.6 Possible location and size of shrinkage defects after improved cast magnesium alloy casing

5 结论

本文针对铸件的铸造工艺问题, 利用 AnyCasting 软件, 对铸件铸造全过程进行了凝固过程的研究, 探索出了较为理想的工艺。利用铸造 CAE 仿真技术的优势, 在不耗费实际生产所需的人力、物力、财力和时间的前提下, 用模拟浇注实验的方式对铸件的铸造工艺方案及工艺参数进行了科学的改进和优化, 获得了以下研究成果:

1、通过理论和实际相结合, 实体模型快速、准确的读入, 网格划分正确, 参数设置合理, 有效合理地分析判据, 验证了对于液态凝固过程及缺陷分析都可以借助合理的物理模型来完成;

2、利用 AnyCasting 软件对铸造镁合金机匣进行了模拟, 并对模拟结果进行分析, 实验结果指出: 当浇注温度为 750℃, 冷铁材料为铸铁时, 镁合金机匣在凝固过程薄壁部位很容易产生缩孔缩松等缺陷; 当浇注温度减低至 690℃, 冷铁材料为铜合金后, 镁合金机匣的薄壁处缺陷倾向明显降低, 甚至消除。从而得出合理的铸造工艺, 用于生产, 提高铸件的出品率。

[参考文献] (References)

- [1] 徐建辉. 壳体类铸件的低压铸造工艺试验研究[J]. 上海电机学院学报. 2007, 10(2): 98~102.
- [2] 吴士平, 于彦东, 王丽萍, 等. 提高充型过程数值模拟运算速度的动态超松弛迭代算法[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(5): 1219~1222.
- [3] 熊守美, 苏仕方. 镁合金成形技术研究进展[J]. 铸造, 2005, 54(1): 20~23.
- [4] 赵建华, 张恒. 凝固过程中铸件/铸型界面间隙研究进展[D]. 重庆: 重庆大学. 2010
- [5] 程军, 柳百成. 用微处理机数据采集系统研究凝固过程热交换条件[A]. 第一届国际铸造合金技术新发展研讨会论文[C], 1988: 97~98.
- [6] 刘一军. 4G93SD4 气缸盖低压铸造数值模拟及工艺优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学. 2007
- [7] 王松涛, 魏国华, 王士一. 航空镁合金铸件常见铸造缺陷的分析及克服[J]. 黑龙江冶金, 2006: 4~6