

铍铝合金支撑座熔模铸造数值模拟

吴健, 王晶, 苏斌, 董鲜峰, 王震宏

(中国工程物理研究院材料研究所, 四川绵阳 621700)

摘要: 铍铝合金具有很宽的结晶温度区间, 铸造凝固过程中易出现缩孔缩松等缺陷。为了优化其工艺方案, 采用ProCAST软件对铍铝合金支撑座熔模铸造过程的温度场、流场进行数值模拟, 预测缩孔缩松缺陷分布规律, 并进行浇注实验验证。结合模拟结果对铸造工艺参数进行优化, 结果表明, 在优化浇道位置的同时, 将铸件薄壁位置壁厚从6 mm增加至10 mm, 可有效抑制铸件中缩孔缩松缺陷的产生。

关键词: 铍铝合金; 熔模铸造; 数值模拟; 缩孔缩松; 工艺优化

作者简介:

吴健(1990-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为特种材料制备及其数值模拟研究。E-mail:

wujian@caep.cn

通讯作者:

苏斌, 男, 高级工程师, 博士。电话: 0816-3626860, E-mail: sub703@126.com

中图分类号: TG249.5

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2020)04-0407-05

基金项目:

国家自然科学基金资助项目(51504266); 国家重点研发计划项目(2016YFB0701201); 中国工程物理研究院材料研究所特聘人才专项基金(TP03201701)

收稿日期:

2019-11-14 收到初稿,
2020-01-06 收到修订稿。

铍铝合金结合了铍的低密度与铝的易加工性, 具有质量轻、比强度高、比刚度大、热稳定性好、高韧性和抗腐蚀等许多优良特性, 是一种重要的新型轻质高强结构材料, 在航空航天、军工等领域具有广泛的应用前景^[1-4]。

目前, 铍铝合金主要有粉末冶金法与精密铸造法两种成形工艺, 相比于粉末冶金方法, 采用铸造方法生产铍铝合金工艺简单, 成本较低, 并且能够生产结构复杂的零件。然而, 铍铝合金固有特性决定了其以铸件形式应用的困难。铍铝合金在凝固过程会发生共晶反应(约644 ℃), 共晶点处铍原子分数仅有2.4%, 铍元素和铝元素几乎互不共溶, 铍铝合金其实是由脆性铍相和韧性铝相组合成的金属基复合材料。铍和铝之间有限的溶解度使得这两种材料在凝固中相互分离, 且铍和铝熔点相差很大(铍为1 287 ℃, 铝为661 ℃), 铍铝合金有着非常宽的凝固温度范围, 造成凝固过程易产生缩孔缩松缺陷^[2]。另外, 由于铍是热容量最高的金属, 凝固过程中热量不容易散失, 铸件中易形成粗大柱状晶, 并伴随热裂现象。如何获得高质量铍铝合金铸件是当前面临的难题。

熔模铸造在铸造精密、复杂、薄壁零件方面具有非常独到的优势^[5], 采用熔模精铸法制备铍铝合金零件, 并采用快速冷却的方式控制合金凝固过程中枝晶长大, 可以克服铍铝合金薄壁件难成形及避免成形过程中产生缩孔缩松等缺陷, 从而制备出合格的铍铝合金铸件。随着计算机技术的发展, 熔模铸造数值模拟也在不断发展中, 并已在生产过程中得到广泛应用^[6-11]。

本文采用ProCAST软件对铍铝合金支撑座熔模铸造过程进行数值仿真, 建立铍铝合金支撑座有限元模型, 对其浇注过程中流场、温度场进行计算, 分析产生缩孔缩松缺陷的原因。由模拟结果进一步调整工艺参数, 降低铍铝合金支撑座熔模铸造缩孔缩松缺陷的产生倾向, 为铍铝合金铸造工艺优化提供依据。

1 数值模拟

1.1 数学模型

在充型过程数值模拟中, 将金属液看成不可压缩的牛顿流体, 其流动过程服从质量守恒和动量守恒。在流场计算的同时耦合温度场计算, 控制方程包括动量守恒方程、能量守恒方程、体积函数方程、连续性方程。充型完成后, 假定液体不再流动, 继续求解温度场, 计算铸件各个位置固相率, 根据每一点瞬时温度和固相率计

算体积收缩量。采用基于Darcy定律发展的宏微观耦合缩孔缩松模型,通过凝固时各部位 g_p (空隙体积分数)的大小就可以判定各个位置缩孔缩松形成的趋势^[8-9]。

1.2 模型的建立

支撑座铸件高106 mm,最大直径434 mm(下端法兰外径),壁厚最薄位置6 mm,根据实际铸造工艺条件,采用三维造型软件UG对铍铝合金支撑座铸件、型壳及浇注系统进行建模,将UG软件导出的文件导入ProCAST软件中进行网格划分,网格为四面体网格,总单元数约50万。模型及网格如图1所示。

支撑座材料采用Be-38wt%Al合金,热物性参数见表1^[11],型壳材料主要为氧化锆陶瓷,热物性参数从ProCAST软件数据库中选取。

浇注前,型壳在炉中热区被加热到400℃,当合金熔体温度到达1350℃后开始浇注,浇注完成后采用冷却介质(液氮)对型壳进行快冷。型壳在热区时,其边界条件为:环境温度400℃,辐射散热系数0.5;型壳移动到冷区时,其边界条件为:环境温度25℃,辐射散热系数0.5;采用冷却介质对型壳进行冷却时,其边界条件为:环境温度0℃,辐射散热系数0.5,对流换热系数 $5\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

1.3 模拟结果及分析

在ProCAST软件中DataCast模块进行运行计算,在Visual-view模块中查看充型过程温度场及固相率变化模拟结果,如图2和图3所示。可以看出,大约2.5 s后金属液通过浇注系统充入型腔,在重力作用下,金属液首先充满底部法兰位置,在四周薄壁部位充满后充满顶部法兰位置,大约7.5 s后充型完成。整个铸造充型过程较为平稳,充型后绝大部分金属液温度在液相线以上。铸件在27 s左右完全凝固,中部圆孔附近为最先凝固区域,上、下端法兰为最后凝固区域。

图4为凝固后铸件发生缩孔缩松缺陷可能性较大位置。可以看出,除浇道外,上端法兰和下端法兰位置为容易出现缩孔缩松缺陷的区域。这是因为铸件在薄壁处凝固最快(壁厚仅有6 mm),而上、下端法兰部位比较厚大,凝固较慢得不到金属液补缩,在这些部位便容易发生缩孔缩松缺陷。

为了验证模拟结果准确性,开展铍铝合金支撑座熔模铸造试验,并获得铍铝合金铸件。采用工业CT断层扫描铍铝合金铸件,上、下端法兰部位断层检查结果如图5所示,可以看出,在铸件上、下法兰位置有较为明显的缩孔缩松缺陷,图4中缩孔缩松缺陷形成可能性较大位置得到了试验验证。

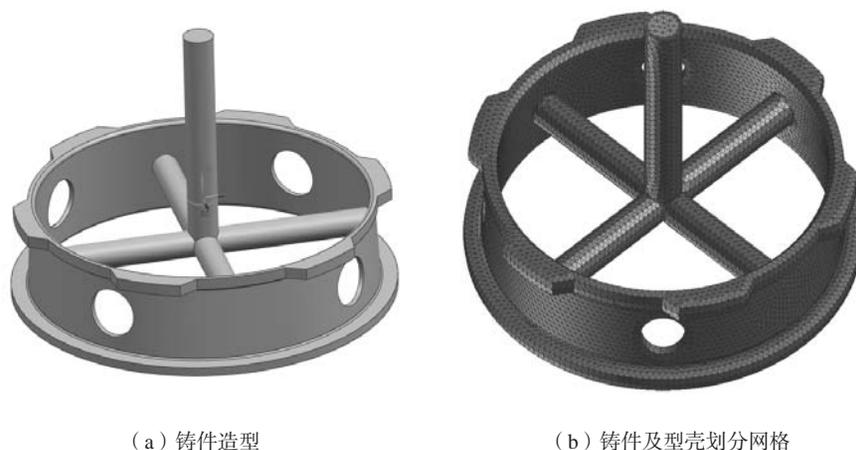


图1 模型及网格划分
Fig. 1 Model and mesh

2 工艺优化

2.1 浇注系统优化

从图4和图5结果可知,由于法兰为铸件壁厚较大部位,凝固过程冷却速率较慢,容易产生缩孔缩松缺陷。为了减小缺陷形成,可以考虑将浇道布置在上端法兰处以保证其易于充型与补缩,优化方案及模拟结果如图6所示。可以看出,当浇道位置改为上端法兰位置时,缩孔缩松区域仍出现在上、下端法兰位置,但

表1 主要热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of materials

参数名称	Be-38wt%Al	型壳
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 050~2 150	2 780
热导率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	60~185	0.83~0.97
比热容/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	1.55	0.44~0.85
液相线温度/K	1 355	-
固相线温度/K	919	-

形成趋势相比于图4有所减小, 结果表明仅通过改变浇道位置难以避免法兰处缩孔缩松缺陷的形成。

2.2 铸件壁厚优化

从铸件结构来看, 上下法兰部位连接区域为薄壁部位, 充型凝固过程中冷却速率较快可能导致下端法兰部位凝固后期无法得到有效补缩。为此, 在浇道位置优化的基础上, 可以考虑增加铸件薄壁位置壁厚

(图1所示), 提高熔体补缩能力, 减少法兰处缩松缺陷形成。优化方案及模拟结果如图7所示。可以看出, 将浇道位置改为上端法兰, 同时将铸件薄壁位置壁厚从6 mm增加至10 mm时, 缩松缺陷仅出现在流道中, 该优化工艺方案有效。在实际生产中, 采用优化后的工艺方案进行铍铝合金支撑座铸件浇注实验, 经检测, 铍铝合金铸件满足技术条件要求, 缩孔缩松缺陷得到有效控制。

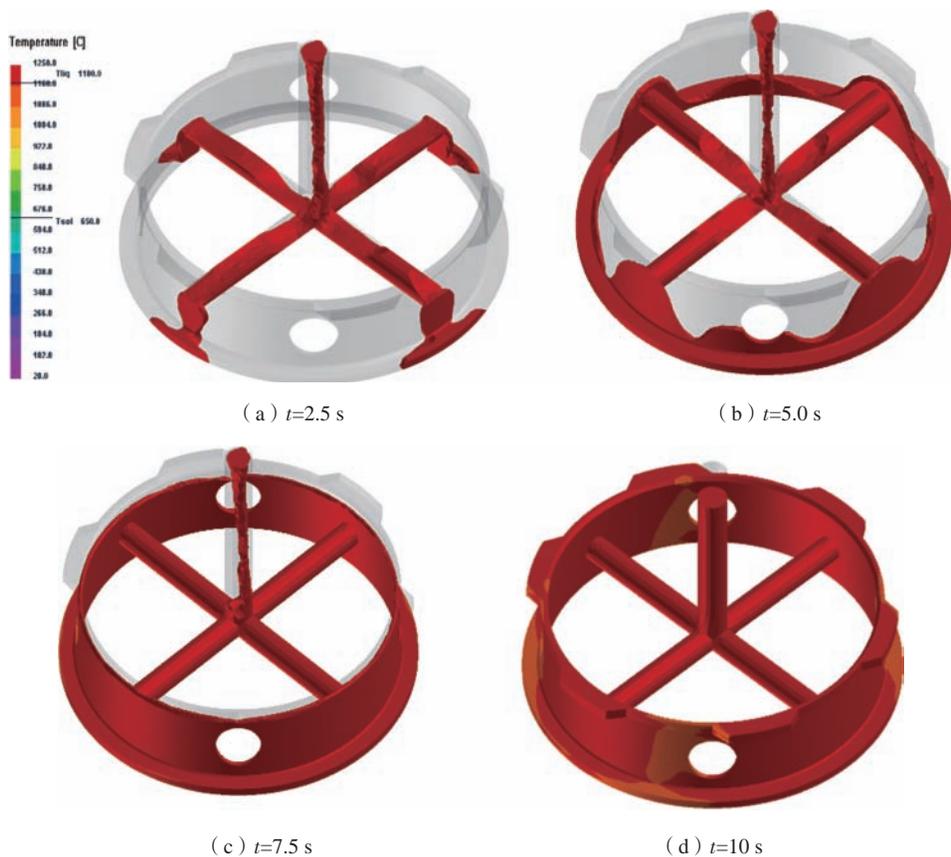


图2 充型过程模拟结果

Fig. 2 The evolution of filling process at different times

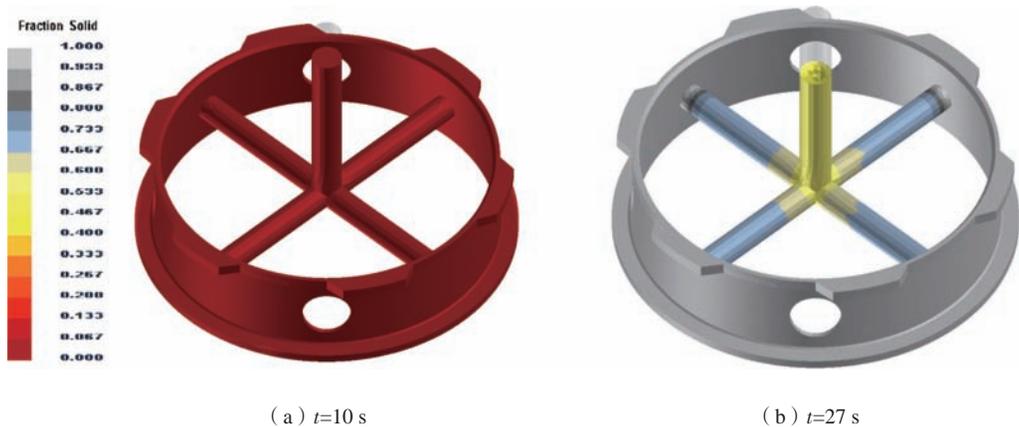


图3 凝固过程固相率模拟结果

Fig. 3 The evolution of solid fraction at different times

3 结论

(1) 采用ProCAST软件对铍铝合金支撑座熔模铸造过程进行数值模拟, 获得了铸造过程中熔体的流场、温度场, 预测了铸件缩松缩孔缺陷分布规律。

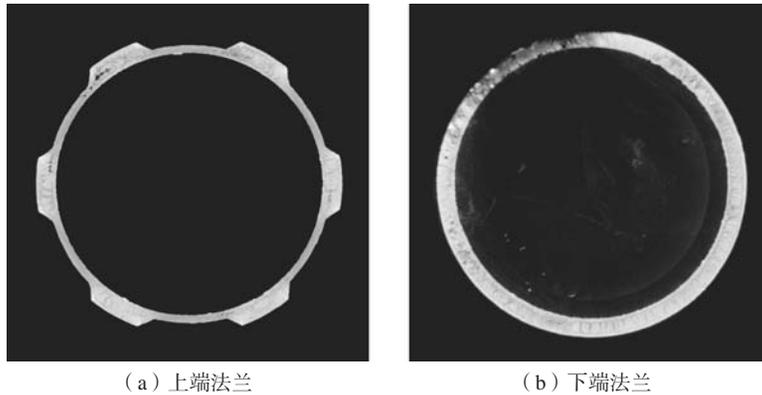
(2) 开展了铍铝合金支撑座铸造实验, 采用工业CT对铍铝合金铸件进行断层扫描, 实验结果验证了模拟结果的准确性。

(3) 结合模拟仿真结果对铸造工艺进行优化, 将浇道位置改为上端法兰, 同时将铸件壁厚从6 mm增加至10 mm时, 可有效抑制缩松缺陷产生。



图4 铸件缩孔缩松预测结果

Fig. 4 Simulation result of shrinkage porosity

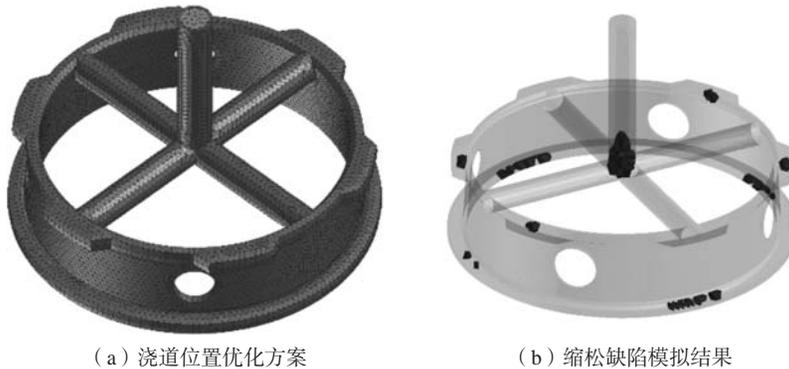


(a) 上端法兰

(b) 下端法兰

图5 探伤结果

Fig. 5 Results of CT testing

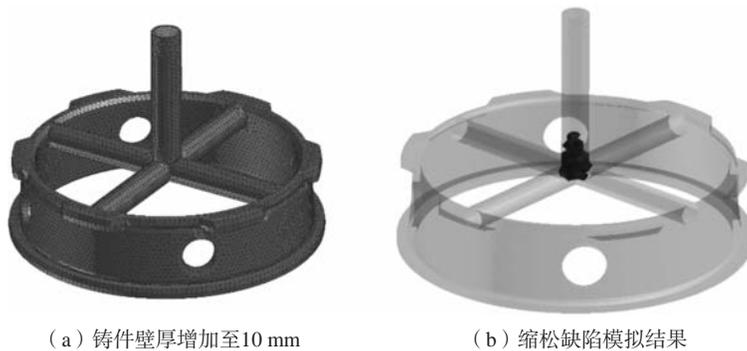


(a) 浇道位置优化方案

(b) 缩松缺陷模拟结果

图6 浇道优化方案及模拟结果

Fig. 6 Ingate position optimized and Simulation result of shrinkage porosity



(a) 铸件壁厚增加至10 mm

(b) 缩松缺陷模拟结果

图7 铸件壁厚优化方案及模拟结果

Fig. 7 Wall thickness of casting increased from 6 mm to 10 mm and Simulation result of shrinkage porosity

参考文献:

- [1] 刘孝宁, 马世光. 铍铝合金的研究与应用 [J]. 稀有金属, 2003, 27 (1): 62-65.
- [2] 李军义, 王东新, 刘兆刚, 等. 铍铝合金的制备工艺与应用进展 [J]. 稀有金属, 2017, 41 (2): 203-210.
- [3] 李军义, 谢焱, 王东新, 等. 热等静压对铍铝合金组织及性能的影响 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2018, 46 (1): 65-69.
- [4] 余良波, 王晶, 王震宏, 等. 铸造Be-37.6Al-0.4Sc合金的力学性能及断裂行为研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (2): 117-122.
- [5] 孙敏. 熔模铸造 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- [6] 李殿中, 康秀红, 夏立军, 等. 可视化铸造技术的研究与应用 [J]. 铸造, 2005, 54 (2): 148-152.
- [7] XU Q Y, LIU B C, PAN D, et al. Progress on modeling and simulation of directional solidification of superalloy turbine blade casting [J]. China Foundry, 2012, 9 (1): 68-77.
- [8] 孙长波, 周君华, 尚伟, 等. 基于ProCAST的大型复杂空心叶片精铸的数值模拟 [J]. 铸造, 2012, 61 (9): 1026-1030.
- [9] 唐宁, 闫学伟, 许庆彦, 等. 基于ProCAST二次开发的叶片LMC凝固特征模拟 [J]. 铸造, 2014, 63 (4): 347-351.
- [10] 谢秋峰, 薛鑫, 吴亚夫, 等. 基于ProCAST涡壳体铸件精铸过程数值模拟研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (7): 647-652.
- [11] WANG Z H, WANG J, YU L B, et al. Numerical simulation and process optimization of vacuum investment casting for Be-Al alloys [J]. International Journal of Metalcasting, 2019, 13 (1): 74-81.

Numerical Simulation of Solidification Process of Be-Al Alloy Bracket in Investment Casting

WU Jian, WANG Jing, SU Bin, DONG Xiang-feng, WANG Zhen-hong
(Institute of Material, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621700, Sichuan, China)

Abstract:

Due to large freezing range, shrinkage porosity frequently occurs in Be-Al alloy castings. In order to optimize casting process parameters, the investment casting process of Be-Al alloy bracket was studied by numerical simulation method. The evolutions of the flow field and temperature field as well as the formation of shrinkage porosity defect were simulated, and a pouring experiment was carried out to verify the simulation results. Based on the simulation results, the casting process parameters were optimized. The results show that shrinkage defects in the casting could be reduced, when the gate location was optimized and the wall thickness of the casting increased from 6 mm to about 10 mm.

Key words:

Be-Al alloy; investment casting; numerical simulation; shrinkage porosity; process optimization
