

合金钢支架熔模铸造的工艺优化

张晓光¹, 王云鹏¹, 王晓鹏², 李远志¹, 陈 奇¹

(1. 辽宁工业大学 机械工程与自动化学院, 辽宁锦州 121001; 2. 中铝山东工程技术有限公司, 山东淄博 255000)

摘要: 在分析了合金钢支架铸件原熔模铸造工艺产生缩孔、缩松及浇不足等铸造缺陷的基础上, 经过Pro/E和ProCAST 两种软件相结合的形式对其铸造工艺进行优化。通过对铸件的浇注位置、排气位置等进行合理的改进, 使铸件缺陷明显减少, 合金钢支架成品率和表面质量提高。

关键词: 熔模铸造; 合金钢; 支架; 铸造缺陷

很多铸造缺陷(如气、渣、水、砂眼等)都是在成形条件不利的状况下产生的。因此, 首要的是充分了解和控制浇注过程。因为浇注过程存在一定的复杂性, 所以掌握和控制浇注过程是尤为重要的。从20世纪80年代初开始, CAE商业软件逐渐增多, 从功能的角度来看, 大多数软件基于有限差分法, 这些软件能够模拟铸造过程的温度场和流场, 包括低压铸造、熔模铸造、砂型铸造、金属铸件、铸件缺陷(收缩等)均可在虚拟仿真环境中显示在计算机中, 最后可进行优化设计, 得出理想的铸造工艺^[1-5]。

1 合金钢连接铸件结构

合金钢支架在船舶、汽车、机械制造等框架结构中具有至关重要的作用, 铸件材质为JDM B2K4140, 化学成分如表1所示。铸件外部轮廓复杂, 内部型腔不规则, 由圆形面、矩形面、斜面、圆弧面及筋板组成。壁厚均匀, 整个铸件的壁厚为5~8 mm, 外轮廓尺寸为112 mm×68 mm。利用Pro/E三维绘图软件建立工件模型, 如图1所示。铸件不允许有影响表面和内部力学性能的铸件缺陷, 如气孔、夹渣、缩孔和裂纹。

表1 JDM B2K4140合金钢的化学成分
Table 1 Chemical compositions of JDM B2K4140 alloy steel $w_B/\%$

C	Si	Mn	S	P	Fe
0.38~0.43	0.15~0.35	0.75~1.0	0.040	0.035	余量

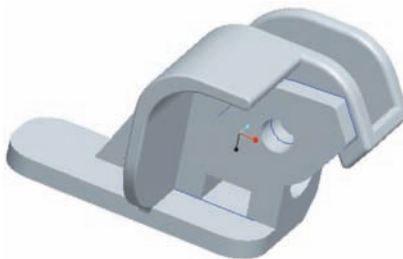


图1 支架的三维模型
Fig. 1 3D model of the bracket

作者简介:

张晓光(1977-), 男, 教授, 硕士, 硕士生导师, 主要研究方向为模具设计与制造。E-mail: lgdsk2008@163.com

通讯作者:

王云鹏, 男, 硕士研究生。电话: 13355249162, E-mail: 13355249162@126.com

中图分类号: TG249.5

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2023)09-1175-06

基金项目:

辽宁省科学技术计划项目(省博士科研启动基金计划项目: 2021-BS-261)。

收稿日期:

2022-09-14 收到初稿, 2023-07-28 收到修订稿。

2 熔模铸造工艺设计

2.1 浇道选择

熔模铸造浇注系统的常见形式：浇口内浇道，流道内浇道。通过分析合金钢支架的结构特点，可以知道铸件底部为长方体结构，上方有曲面，弧面，筋板，平面连接形成的薄壁复杂结构。为了保证铸件在充型过程中的稳定性，保证铸件在充型过程中凝固均匀，补缩良好，降低缩松缩孔缺陷的产生，并按照生产要求提高生产效率，铸件采用直浇道-内浇道^[6-8]的浇注形式。

2.2 建立浇注仿真模型

将绘制的三维实体模型导入铸造仿真软件ProCAST中。在meshcast模块对导入的模型进行有限元网格划分，划分后网格总节点数26 088，总单元数198 931，初始工艺方案图如图2所示。

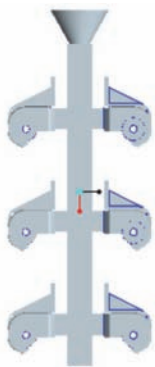


图2 支架的初始工艺方案图
Fig. 2 The initial process plan of the bracket

2.3 仿真模拟有关参数的设置

在ProCAST模块中设置材料种类、换热系数、边界条件（热、温度、浇注速度等）、重力加速度条件、初始条件（型壳、铸件、空气等温度）以及ProCAST运算时的时间、步数等参数^[9-10]。

在铸造充型模拟凝固模拟过程当中，铸件的浇注速度，浇注条件，以及壳体，铸件和外界之间的传热系数均是边界条件。铸件外壳主要材料为石英砂，一般模拟时铸造外壳在空气中的传热系数为500 W/K；铸件材质为JDM B2K4140，假设外界空气与铸件的换热系数为1 000 W/(m²·K)。

3 初始工艺数值模拟结果与分析

3.1 确定浇注速度

浇注速度的快慢与填充铸型所需的时间密切相关，合适的浇注速度，可以使型壳更有效地被金属液

所充满，尽可能降低金属的氧化，有助于铸件及时凝固。如果速度过快，则会发生金属液飞溅，产生气孔等弊端；但浇注速度过慢，则铸件会出现明显的温差，容易产生冷隔，造成浇不足等弊端。因此，合理的浇注速度是获取高品质铸件的保障。

浇注速度根据卡尔金公式可知：

$$v = 0.22 \times \frac{\sqrt{h}}{d \cdot \ln \frac{T}{380}} \quad (1)$$

式中： v 为金属液的浇注速度，单位为cm/s； h 为铸件高度，单位为cm； d 为铸件壁厚，单位为cm； T 为合金的浇注温度，单位为℃。

根据式（1）计算得到浇注速度 $v=153.065$ mm/s。综合各方面因素，选取153 mm/s作为本次试验的浇注速度。

3.2 主要工艺参数

由有关试验可知，铸件材质JDM B2K4140合金钢的固相线温度为1 429℃，液相线温度为1 498℃；型壳总共8层，材料由硅溶胶和石英砂组成，厚度大约8 mm；为了保证铸件的质量和铸造周期，最开始将型壳加热到1 000℃，在1 560℃的温度下以153 mm/s的浇注速度进行浇注，整个浇注过程采用顶注式的浇注方法在空气中完成操作。浇注完成后，铸件需要在自然条件下进行冷却。

3.3 结果与分析

支架初始工艺方案在不同时刻会存在不同的充型形态，初始工艺方案前4 s充型状态图（单位：℃）如图3所示。

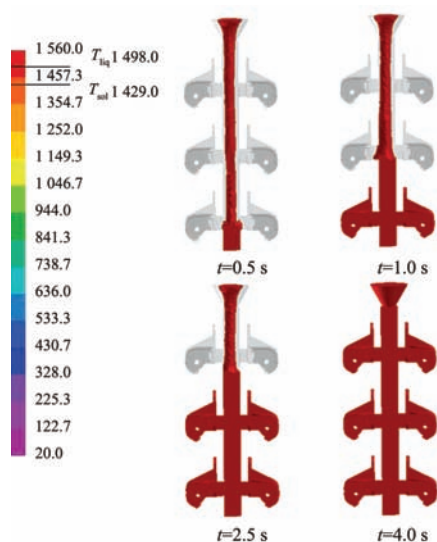


图3 初始工艺方案不同时刻充型状态图
Fig. 3 Filling state diagram of the initial process plan at different time

根据充型状态图可知, 充型过程整体较为平缓, 金属液没有发生明显的迸溅、撞击型壁的现象。根据图3可知, 在1 s后金属液便充满直浇道, 开始流向内浇道。到4 s时整个型壳便充满金属液, 充型过程比较平稳。由此时刻温度场可知, 已经开始凝固, 浇注系统在整体上是按照顺序凝固, 不过铸件上局部温度已经接近固相线温度, 而零件侧面凸台和圆弧面连接处, 此时还没有完全凝固, 有可能在该部位会产生缩孔缺陷^[11-12]。

支架初始工艺方案不同时刻凝固率图(单位: %)如图4所示。

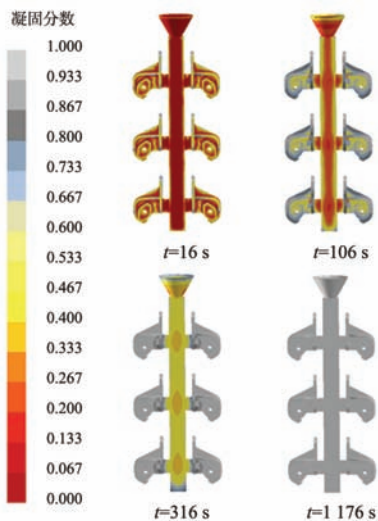


图4 初始工艺方案不同时刻凝固率

Fig. 4 Solidification rate at different time of the initial process scheme

由图4可知, 整个铸件在凝固过程中, 基本上遵循了由外向内、由下向上的顺序, 这对铸件的质量至关重要。在106 s时铸件便由外侧向内逐渐凝固, 图中灰色部分为已经凝固部分, 凝固率大约为5%~8%; 在316 s时, 铸件只有直浇道部分未凝固; 整个浇注系统冷却至500 ℃共需要1 176 s。初始工艺缩孔分布图(单位: %)如图5所示。

图5所示为支架初始工艺方案通过三维仿真软件分析出体积分数大于0.1的缩孔分布图, 由缩孔分布图可知, 缩孔缩松区域主要集中在零件侧面和圆弧面的连接部分, 如图中深色显示部分, 其中缩孔率总和为0.92。因为许多缩孔分布在铸件的主体部分, 所以铸件的质量难以得到保证。造成缩孔缺陷的主要原因有工艺方案设计不合理和设定的工艺参数有偏差等两方面, 导致铸件在凝固时体积收缩得不到补缩所产生的缩孔。为了保证铸件质量, 需要先优化工艺方案, 制定合理的浇注系统, 其次优化铸件的工艺参数。

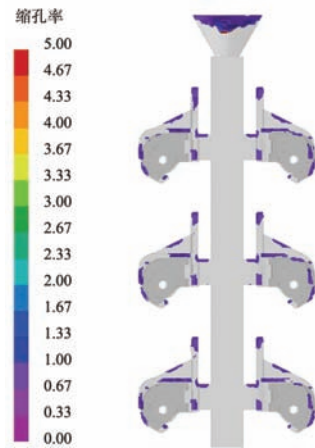


图5 初始工艺缩孔分布

Fig. 5 Distribution of shrinkage in initial process

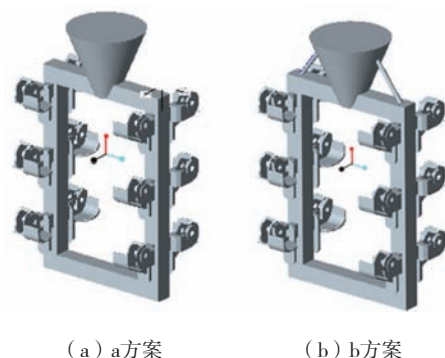
4 铸造工艺的优化与模拟

4.1 初始工艺方案缺陷分析和修改

通过对初始工艺方案的仿真分析可知, 缩孔缩松部位集中分布在圆弧面和零件侧面的连接部分及零件的凸台部分, 铸件的质量并没有受到直浇道缺陷的影响。缩孔最严重的部位位于铸件的圆弧连接处, 通过图4可知, 铸件在凝固时优先凝固圆弧面, 从而阻碍了补缩通道, 致使连接件结构凝固过程中, 体积不断收缩而得不到及时补缩。

根据初始工艺方案存在的不足, 对浇注系统进行改进。在初始工艺方案的基础上, 添加气管或更改组树的样式, 设计了以下两种优化工艺方案, 三维造型图如图6所示。图中a方案为改变组树的形状, b方案为在a方案的基础上增加两道内浇道。依次对两种不同方案进行模拟分析, 并对凝固结果进行分析对比。

利用ProE软件对支架进行三维造型, 再导入ProCAST软件中的mesh CAST模块, 进行网格划分, 采用自动生成网格的方法, 网格的大小为8 mm。为了与初始方案对比, 其他边界条件、工艺参数与初始工艺



(a) a方案

(b) b方案

图6 优化工艺方案三维造型图

Fig. 6 3D modeling diagram of the optimized process plan

方案相同。

4.2 优化方案数值模拟结果和分析

图7所示为a方案数值模拟不同时刻凝固状态图(单位:%)。

由图7可知, a方案的铸件从开始凝固至最后完全凝固时间是3 434 s。金属液是从外向内的凝固顺序逐渐凝固, 其中铸件上下内浇道先凝固, 直浇道最后才凝固; 在244 s时, 除黄色部分其余全部凝固完毕, 此时的凝固率为53%; 在924 s时, 下端管道要比缩颈处优先凝固, 补缩效果较之前不再明显, 由此缩颈处易发生缩孔等缺陷。铸件在3 434 s完全凝固, 凝固率100%。

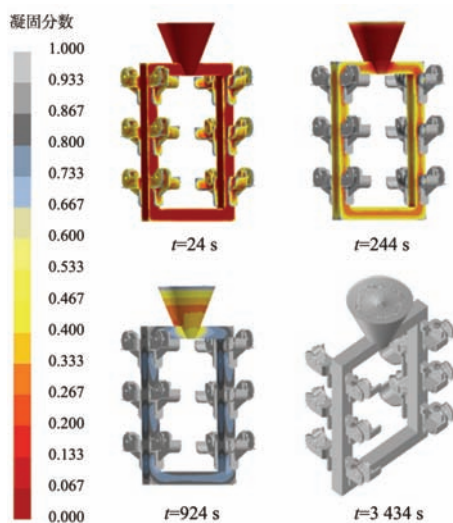


图7 a方案不同时刻凝固状态图

Fig. 7 The solidification state diagram of scheme a at different time

b方案数值模拟不同时刻凝固状态图(单位:%)如图8所示。

由图8可知, b方案的铸件从开始凝固至最后完全凝固时间为3 309 s。金属液同样按照从外向内的凝固顺序开始凝固, 在669 s时, 下内浇道和铸件开始凝固, 此时凝固率在70%左右, 逐渐失去对铸件的补缩作用; 铸件在3 309 s完全凝固, 凝固率100%。

通过a、b两种方案的凝固情况可知, b方案在铸件成形时要比a方案合理, 增添的内浇道对铸件起到了部分补缩作用。

各工艺方案缩孔分布图(单位:%)如图9所示。

如图9所示为支架在两种工艺方案下数值分析后体积分数大于0.1的缩孔分布和尺寸大小, 由不同的色标值可知, a工艺方案的缩孔率大约为0.8, b工艺方案的缩孔率大约为0.6。b方案的缩孔率要小于a方案的缩孔率, 同时与初始方案的0.92相比, 改进后的方案有显著的减少, 因此b方案要优于原始工艺方案和a方案。

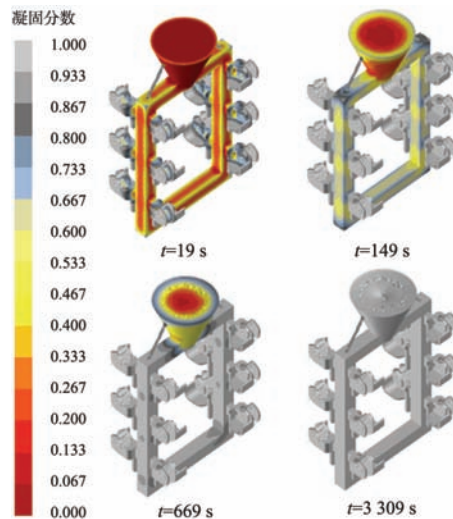
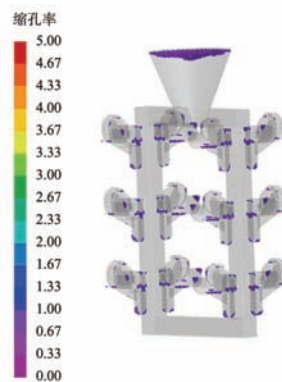
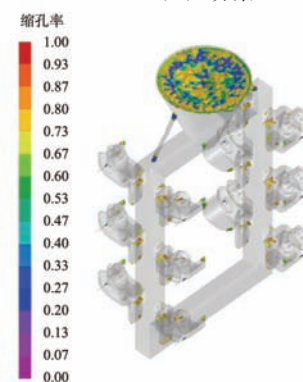


图8 b方案不同时刻凝固状态图

Fig. 8 Solidification state diagram of scheme b at different time



(a) a方案



(b) b方案

图9 不同工艺方案缩孔分布图

Fig. 9 Shrinkage distribution of each process scheme

5 铸造工艺参数优化

在熔模精密铸造中, 影响铸件成形质量的因素很多, 本文主要针对型壳的预热温度、浇注速度和浇注温度三个主要工艺参数进行研究分析^[13-14]。

根据模拟试验依据, 浇注温度选取1 500~1 560 ℃、浇注速度选取335~350 mm/s、预热温度选取1 000~1 100 ℃。采用正交实验方法构建正交实验表, 以铸件的缩孔率为依据, 对工艺参数进行正交优化实验。表2所示为本次试验3因素3水平的正交实验表。

表2 正交实验因素表
Table 2 Orthogonal experiment factor table

水平	因素		
	A浇注温度/℃	B浇注速度/(mm·s ⁻¹)	C型壳预热温度/℃
1	1 500	335	1 000
2	1 550	340	1 050
3	1 560	350	1 100

利用正交实验法, 对不同水平不同因素的工艺参数建立实验方案, 如表3所示。对9组方案依次进行有限元仿真, 并得出缩孔缩松的总值。

表3 正交实验方案和结果
Table 3 Orthogonal experimental scheme and result

水平	因素A	因素B	因素C	充型时间/s	缩孔率/%
L1	1	1	1	4.081	0.671
L2	1	2	2	3.651	0.633
L3	1	3	3	3.338	0.642
L4	2	1	2	3.092	0.651
L5	2	2	3	3.712	0.652
L6	2	3	1	3.491	0.633
L7	3	1	3	3.520	0.689
L8	3	2	2	3.471	0.621
L9	3	3	1	3.065	0.570

由表4可看出, 第9组实验的缩孔率最低为0.570, 而第7组实验的缩孔率最高为0.689, 因此第9组铸件质量要优于其他实验组。由极差分析法所得到最佳工艺参数组为A3B3C1(表4)。

表4 最优工艺参数方案和结果表

Table 4 Optimal process parameter scheme and result table

最优方案	浇注温度/℃	浇注速度/(m·s ⁻¹)	型壳预热温度/℃	充型时间/s	缩孔率/%
A3B3C1	1 560	350	1 000	3.96	0.570

通过分析得出支架铸造的最优方案, 并对支架进行实际铸造, 得到实际铸件如图10所示。铸件没有出现砂眼等明显缺陷, 达到了预期效果, 符合实际生产需求。



图10 支架实际铸件

Fig. 10 Actual casting of the stent

6 结束语

(1) 利用ProCAST铸造分析软件对合金钢支架熔模铸造过程中的温度场、流场和缩孔缩松等缺陷进行数值仿真分析, 并且通过优化铸造工艺方案从而提高了合金钢支架的产品性能, 为今后的实际生产过程提供了指导意见。

(2) 在优化过程中通过改变铸件在浇注过程中的流道的位置和排气位置, 对选定的初步方案进行优化, 通过对模拟浇注结果的分析, 并且加以改善铸件缺陷, 最终获得了最优的浇注工艺方案, 从而提高了合金钢支架熔模铸造模具设计的开发效率和质量。

参考文献:

- [1] 邹晓文. 铸造模拟软件ProCAST[J]. 材料导报, 2006(10): 16.
- [2] 胡红军. ProCAST软件的特点及其在铸件成形过程中的应用[J]. 热加工工艺, 2005(1): 70-71.
- [3] 黄桦, 陈之伟, 宋吉浩, 等. 铸造模拟软件在凸轮轴铸造工艺优化中的应用[J]. 现代铸铁, 2013, 33(2): 52-56.
- [4] 李峰, 郑福生, 王刚, 等. 基于ProCAST的叶轮熔模铸造凝固过程数值模拟[J]. 热加工工艺, 2013, 42(7): 55-57.
- [5] 张晓光, 藏思鸿. 基于CAD/CAM技术的割草机壳盖零件熔模铸造蜡模设计[J]. 铸造技术, 2017, 38(5): 1228-1230, 1237.
- [6] 白月香, 张勇明. 基于Pro/E的模具数控铣削加工[J]. 煤矿机械, 2012, 33(1): 139-140.
- [7] 饶磊, 李小龙, 胡启耀, 等. 基于Pro/E预处理的ProCAST有限元网格生成方法[J]. 南昌大学学报(工科版), 2011, 33(3): 269-272.

- [8] 张旭, 王建民, 张康全, 等. 基于ProCAST的铝合金轮毂生产工艺研究 [J]. 铸造技术, 2012, 33 (2): 203-205.
- [9] 余四红, 贾相武. 基于ProCAST的壳体铸件数值模拟铸造工艺优化 [J]. 铸造技术, 2010, 31 (10): 1347-1350.
- [10] 范晓明, 王志, 龙志平, 等. 基于ProCAST的叶轮铸件铸造工艺优化 [J]. 中国铸造装备与技术, 2014 (4): 11-13.
- [11] 王宇航, 苏小平. 铝合金薄壁壳体低压铸造工艺方案设计 [J]. 铸造, 2022, 71 (8): 990-993.
- [12] 韩宝, 马彦伟, 李志杰, 等. 基于ProCAST的轮轴铸钢件砂型铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 253-258.
- [13] 刘继广, 王殿飞, 方晓刚, 等. 高铁挂架熔模铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2021, 70 (8): 968-975.
- [14] 传海军, 刘高峰, 杨新强, 等. 操纵壳体压铸充型和凝固过程的数值模拟 [J]. 铸造, 2015, 64 (2): 130-134.

Process Optimization of Investment Casting for Alloy Steel Bracket

ZHANG Xiao-guang¹, WANG Yun-peng¹, WANG Xiao-peng², LI Yuan-zhi¹, CHEN Qi¹

(1. Mechanical Engineering & Automation College, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China; 2. Chinalco Shandong Engineering Technology Co., Ltd., Zibo 255000, Shandong, China)

Abstract:

On the basis of analyzing the casting defects such as shrinking holes, shrinkage, and insufficient casting, the formation of Pro/E and ProCAST is optimized on the basis of the alloy steel bracket casting process. By rationally improved the casting position and exhaust location, the casting defects were significantly reduced, and the yield and surface quality of the alloy steel stent were improved.

Key words:

investment casting; alloy steel; bracket; dispersed shrinkage
