

升降臂的熔模铸造工艺设计及优化

王海洋, 李远志, 张晓光

(辽宁工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁锦州 121001)

摘要: 升降臂因其结构较为复杂, 在熔模铸造过程中常常会出现缩松、缩孔等缺陷。通过数值模拟仿真软件ProCAST, 基于初始工艺方案的仿真结果, 为了降低铸件的缩孔率, 对浇注系统进行改进。并对浇注温度、浇注速度、型壳预热温度三个影响铸件成形质量的工艺参数进行正交实验, 通过对比分析得到最优工艺方案A1B2C2: 型壳预热温度1 050 °C, 浇注温度1 500 °C, 浇注速度450 mm/s。优化后的工艺参数使得产品的工艺质量和生产效率得到明显提高。

关键词: 升降臂; 熔模铸造; 浇注系统; ProCAST软件; 正交实验

工业升降臂能模仿人的手臂动作, 是一种重要的自动化机械装置, 能够按照程序轨迹和要求对既定对象进行捕获、运输等操作。本文在对某型升降臂的初始工艺方案进行分析的基础上, 改进了其熔模铸造工艺, 降低了缩孔率。优化思路和优化结果为同类型产品的铸造工艺设计提供了参考^[1-2]。

1 升降臂铸件结构

升降臂是一种在工业生产中常见的铸件产品, 因其良好的稳定性, 在许多场合得到广泛应用, 其材质为ZG0Gr18Ni9Ti, 是一种不锈钢铸件, 该铸件材料成分参数如表1所示^[3]。升降臂铸件壁厚均匀, 但结构复杂, 其外形轮廓尺寸约为70 mm × 45 mm × 57 mm, 平均壁厚为6 mm。铸造过程中不允许产生对铸件整体质量有较大影响的工艺缺陷, 如气孔等。铸件整体结构复杂, 可分为阶梯轴部分, 通孔连接部分以及U型爪工作部分。通过Pro/E软件对升降臂进行三维实体建模^[4], 如图1所示。

表1 ZG0Gr18Ni9Ti的化学成分

Table 1 Chemical composition of the ZG0Gr18Ni9Ti

w_B /%

C	Si	P	S	Cr	Ti	Mn	Ni
≤0.8	≤1.5	≤0.045	≤0.030	17.0~20.0	0.3~0.7	0.8~2.0	8.0~11.0

2 熔模铸造工艺设计

2.1 浇道选择

升降臂铸件整体结构不规则, 其结构主要由爪形工作区、通孔螺母连接部分及阶梯轴构成, 为使铸件充型过程相对平稳以及铸件能够按顺序进行凝固, 铸件的浇注系统设计采用横浇道-直浇道-内浇道设计^[5-7], 一型6件组合。

2.2 浇注模型的建立

在升降臂三维模型的基础上建立其浇注系统的三维模型, 对其进行网格划分, 得到升降臂浇注系统的三维有限元模型。mesh值取4 mm, 自动生成有限元网格, 网格总节点数34 928, 总单元数249 485。初始工艺浇注系统方案图如2a所示, 初始工艺浇注系统有限元模型如图2b所示。

作者简介:

王海洋(1970-), 男, 副教授, 主要从事机械设计、模具设计与制造研究。电话: 13841645555, E-mail: 13841645555@163.com

通信作者:

李远志, 男, 硕士生, 电话: 15581600696, E-mail: lyz0696@163.com

中图分类号: TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)08-1027-05

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:

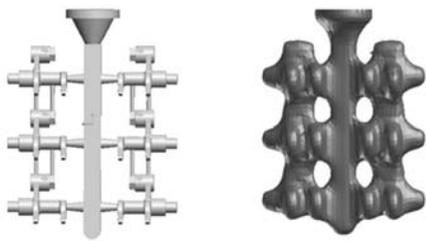
2022-02-18 收到初稿,

2022-03-15 收到修订稿。



图1 升降臂三维模型

Fig. 1 The 3D model of the lifting arm



(a) 初始方案浇注系统 (b) 三维有限模型

图2 升降臂的初始方案浇注系统和三维有限模型

Fig. 2 The gating system and 3D finite element model of the initial scheme of the lifting arm of

2.3 仿真模拟有关参数设置

在ProCAST软件中准确设置仿真参数才能获得精确的模拟结果。在模拟熔模铸造时，涉及到的仿真参数较多，如换热系数、边界条件（浇注速度、热、温度等）、初始条件（型壳、铸件、空气等温度）、材料参数等。试验中对仿真参数作如下设定：浇注时型壳的温度为850℃，并且型壳温度无变化，型壳厚度约为6mm。浇注温度1500~1550℃，取1530℃。重力加速度设置为9.8 m/s²，设置重力方向为负Y方向是根据铸件的浇注方式以及浇口面的方向相同。设置铸件与空气的冷热交换系数取1000 W/(m²·K)，传热系数取500 W/(m²·K)，其余采用默认设置^[8-10]。

3 初始工艺数值模拟结果和分析

3.1 浇注速度的确定

本试验以卡尔金公式计算其浇注速度：

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

式中： v 为充型金属液浇注速度，cm/s； h 为铸件高度，cm； δ 为铸件壁厚，cm； T 为合金的浇注温度，℃。通过计算得浇注速度 $v=344.6167$ mm/s，考虑参数计算的影响，以350 mm/s的速度来模拟浇注速度。

3.2 主要工艺参数

参考相关试验，其中ZG0Gr18Ni9Ti不锈钢的液相线温度为1344.7℃，固相线温度为1235.7℃；整个型壳厚度约为6mm，由石英砂耐火材料和硅溶胶组合而

成的密闭实体；考虑到铸造质量和周期，整个浇注过程以顶注式的浇注方式在空气中完成，起始时刻型壳预热至1000℃；保持300 mm/s的浇注速度在1530℃的温度下进行浇注，铸件采取自然冷却的方法完成冷却；浇注方向：设置重力方向为负Y方向。

3.3 结果和分析

升降臂初始工艺方案在充型过程中有着不同的充型状态，初始工艺方案前4s的充型状态图（单位：℃）如图3所示。

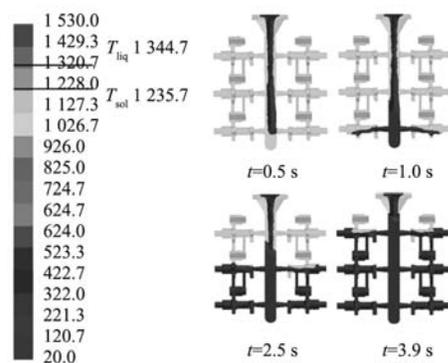


图3 初始方案不同时刻铸件的充型状态

Fig. 3 Filling state of the castings with the original scheme at different time

由图中数据可知，初始方案的整个充型过程整体较为平稳，充型过程中金属液没有对型壳内壁产生激烈的冲击，没有因浇注速度过快导致铸件的破损。金属液快要到达底端的时间大约在0.5s时，1.0s前金属液充完直浇道并且进入第一组工件，充型较平缓。2.5s时第一组工件充型完全，第二组工件充型过半，3.9s时第三组工件充型过半。

浇注过程中，铸件的凝固情况直接影响铸件的成形质量，初始工艺方案不同时刻凝固率（单位：%）如图4所示。

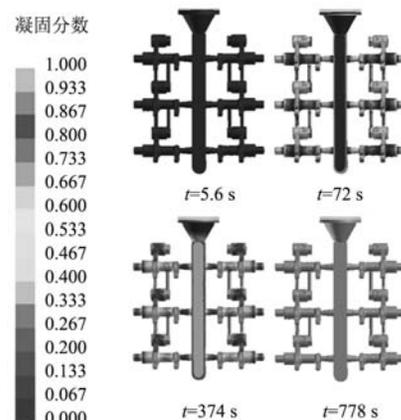


图4 初始方案不同时刻铸件的凝固率

Fig. 4 Solidification rate of the castings with the original scheme at different time

从图中可看出, 72 s时, 浇注系统开始凝固, 整个凝固过程中铸件基本上按由工件向内浇道一直浇道顺序凝固, 这样的凝固顺序有利于铸件的凝固成形, 对提高铸件的工艺质量起着重要的作用。5.6 s时, 铸件完成充型, 升降臂最外部已经开始凝固。374 s时, 工件主体的凝固分数已近似为1.0, 表示工件已基本凝固完全。整个浇注系统完成整体的凝固并自然冷却到1 235 ℃所需约778 s。

初始工艺缩孔分布如图5所示。

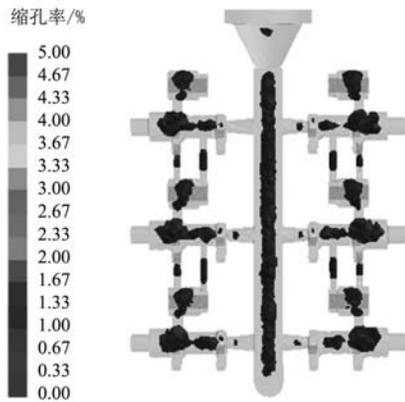


图5 初始工艺铸件的缩孔缩松分布图

Fig. 5 Shrinkage and dispersed shrinkage distribution of the casting with the initial process

升降臂初始工艺方案下, 利用数值模拟技术预测出的体积分数大于1.0的缩孔分布情况, 从分析模拟结果可看出, 缩松、缩孔主要分布在直浇道。另外, 零件轴和连接部分相交的位置出现缩松和缩孔的情况较为严重。该数值模拟结果与初始工艺方案实际生产中造成产品缺陷原因相同, 验证了仿真分析的准确性。

4 优化方案数值模拟结果和分析

4.1 初始工艺方案缺陷分析和修改

铸件连接拐角比铸件缩颈以下的中间部分先凝固, 导致补缩通道阻塞, 铸件生产过程中出现缩孔缺陷的直接原因就是铸件在冷凝过程中体积收缩而不能得到及时和有效的补缩, 根本原因是浇注系统设计不合理和工艺参数取值不科学。考虑到上述原因, 先对铸件工艺方案进行优化, 合理设置浇注系统, 再对铸件的工艺参数进行优化, 保证铸件质量。

在初始工艺方案的基础上对浇注系统进行改进, 为了提高浇注系统的补缩性能, 增加内浇道或者排气道。设计了A、B两种浇注系统优化方案, 如图6所示。

A方案采用单一竖浇道, 与初始工艺方案相比, 在初始工艺方案铸件缩松缩孔比较显著的地方增加排气口, 将相邻工件在U形爪处上下相连, 这样有利于避免金属液凝固过程中热节的产生, 能有效减少缩松缩

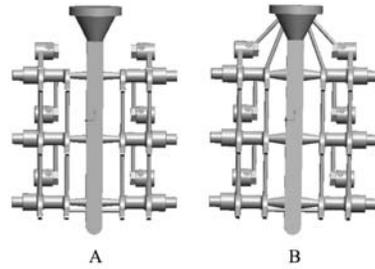


图6 A、B两种优化工艺方案的浇注系统图

Fig. 6 Gating system diagrams of the A and B optimized process schemes

孔的形成;

B方案在A方案的基础上再增加内浇道, 位于零件顶部和主浇道相连。在铸件的凸台上增加了几个大小不等的冒口, 并适当增大从主浇道通向各组工件的浇道的内径尺寸, 保证充型过程中气体更好的排出;

分别就A、B两种方案进行模拟并对结果进行分析。在与初始工艺方案相同的工艺参数和边界条件下对A、B两种方案进行模拟计算并分析研究模拟结果。

4.2 结果和分析

图7为升降臂各工艺方案数值模拟后体积分数大于1.0的缩孔分布和尺寸大小。据图可知A方案铸件产生的缩松远远大于B方案, 说明B方案增加的内浇道对缩松处具有一定的补缩作用。且A、B两方案的补缩效果都明显优于初始工艺方案。

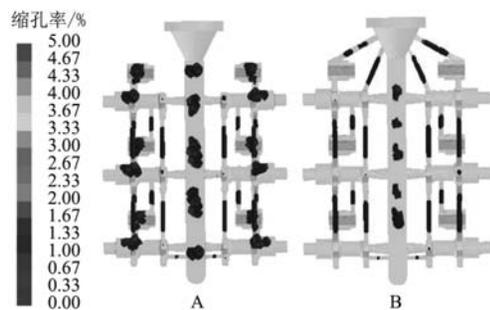


图7 A、B两种优化方案的缩孔缩松分布图

Fig. 7 Shrinkage and dispersed shrinkage distribution diagram of A and B optimization schemes

根据色标值可查出, A方案的缩孔率总和大于10, B方案的缩孔率总和为2.92。因此B方案的浇注系统较初始工艺方案、A方案相比, 有着较大的优化效果。

5 铸造工艺参数优化

影响铸件成形质量的铸造工艺参数较多, 如金属液浇注温度、金属液浇注速度、型壳预热温度和铸件冷却气氛等。本文主要以前三者为分析参数, 研究它们在升降臂的熔模铸造过程中对铸件质量的影响规

律。

在一般的熔模铸造过程中，浇注温度的选择对铸钢件成形质量起着不可忽略的作用。浇注温度过高时，型腔内壁及金属液内空气含量增大，导致在铸钢件内部或表面产生如气孔等缺陷。如果浇注温度过低，金属液的流动性会降低，会使得浇注系统中各组工件之间产生冷隔现象，严重时还会导致工件夹渣。结合本次实验材料304（ZG0Gr18Ni9Ti）的熔化温度1 420~1 460 ℃，出钢温度1 550~1 580 ℃，浇注温度1 500~1 550 ℃，结合生产经验，选择浇注温度为1 500 ℃，1 530 ℃，1 550 ℃。合金钢铸件在铸造过程中的型壳预热温度一般会选择在800~1 015 ℃之间，考虑到升降臂结构较复杂且型壳厚度较薄，为了保证其成形质量，需适当提高型壳的预热温度。所以本模拟研究选择型壳预热温度分别为：1 000 ℃，1 050 ℃，1 100 ℃。

金属液的浇注速度对铸件和整个浇注系统的整体质量有很大影响，速度过大会对铸件表面形成剧烈冲击，速度过小会延长生产周期。基于理论计算的浇注速度，综合生产经验，浇注时间一般为4~6 s、浇注速度300~600 mm/s为宜，选择浇注速度分别为：350 mm/s，450 mm/s，550 mm/s。

运用正交实验法，设计并建立如表2所示的正交实验表，对升降臂的工艺参数进行正交优化实验。

表2 正交实验因素水平表
Table 2 Factors and levels of the orthogonal experiment

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	350	1 000
2	1 530	450	1 050
3	1 550	550	1 100

根据正交实验法可得到如表3所示的9组工艺参数实验方案，分别对这9组方案建立有限元模型进行数值模拟，得到每组实验方案的充型时间，并在view CAST模块中取缩孔缩松孔隙值计算总和，以此为优化参考数值将孔隙值总和填入实验结果缩孔率一栏，如表3所示。

分析表3，通过对比实验L2与L8、实验L6与L9可知，在因素B、因素C相同的情况下，因素A浇注温度在合适范围内越低，浇注系统缩孔率越低，铸件成形质量越好。这与浇注温度越高，金属的液态收缩越大，缩孔的容积越大的机理相符；在此基础上，通过对比实验L3、L5、L7可知，因素B浇注速度取适中速度450 mm/s最合适，浇注速度过低和过快都不利于金属液的浇注成形；通过对比实验L1与L4、实验L2与

表3 正交实验方案和结果

Table 3 Scheme and results of the orthogonal experiment

实验号	因素A	因素B	因素C	充型时间/s	缩孔率/%
L1	1	1	1	3.807 8	1.245 3
L2	1	2	2	3.843 1	1.147 1
L3	1	3	3	4.017 4	1.316 2
L4	2	1	2	3.940 3	1.263 4
L5	2	2	3	3.796 8	1.285 2
L6	2	3	1	4.029 7	1.230 7
L7	3	1	3	3.865 9	1.317 6
L8	3	2	2	3.927 3	1.275 9
L9	3	3	1	3.916 7	1.283 1

L5、实验L3与L6可知，在满足铸件要求的范围内，因素C型壳预热温度越低，缩孔率越低。

依据正交实验的结果，参考各组实验的缩孔率，基于缩孔率最小则最优的原则，由极差分析法得到最优工艺参数组为A1B2C2，如表4所示。

表4 最优工艺参数方案表
Table 4 Scheme of the optimal process parameters

浇注温度/℃	浇注速度/(mm·s ⁻¹)	型壳预热温度/℃	充型时间/s	缩孔率/%
1 500	450	1 050	3.843 1	1.147 1

升降臂最优方案的缩孔缩松分布如图8所示。由图可知，缩松缩孔基本消失，剩余的缩孔都集中在主浇道，对铸件的质量没有影响，铸件的质量得到保证。

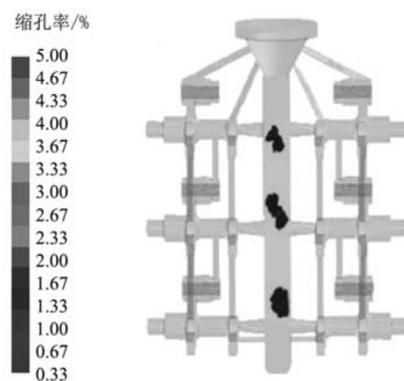


图8 最优工艺方案铸件的缩孔分布

Fig. 8 Shrinkage distribution in the casting with the optimal process scheme

6 结束语

(1) 浇注系统的设计直接影响铸件产品的成形质量，通过设置冒口、增大排气口直径等措施，可有效降低缩孔率。

(2) 基于有限元分析和所设计的正交试验的模拟结果, 在保证质量最优的前提下对工艺参数进行对比分析, 得到最理想的工艺参数组合, 确定浇注温度为 1 500 °C, 浇注速度为 450 mm/s, 型壳预热温度为 1 050 °C。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 潘利文, 高永, 高文理, 等. 基于ProCAST的TiAl叶片缩孔缩松预测及工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30 (6): 504-507.
- [3] 陈学美, 黄瑶, 王雷刚. 汽车发动机下缸体低压铸造工艺及模具设计 [J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31 (8): 727-730.
- [4] 张晓光, 臧思鸿. 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 (5): 1228-1230.
- [5] 白月香, 张勇明. 基于Pro/E的模具数控铣削加工 [J]. 现代机械, 2011, 33 (6): 15-16.
- [6] 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.
- [7] 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 (2): 72-74.
- [8] 张晓光, 张宁, 臧思鸿. 利用新山判据对球磨铸铁支架缩松缩孔的预测 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (3): 91-93.
- [9] 汪琴. 变速箱箱体的铸造工艺研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- [10] 陈宗民. 汽车壳体低压铸造工艺与模具设计 [J]. 热加工工艺, 2008, 37 (1): 79-81.

Design and Optimization of Investment Casting Process of Lifting Arm

WANG Hai-yang, LI Yuan-zhi, ZHANG Xiao-guang

(College of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

Abstract:

Because of its complex structure, the lifting arm often has defects such as shrinkage and dispersed shrinkage in investment casting process. Through the numerical simulation software ProCAST, based on the simulation results of the initial process scheme, the casting system was improved in order to reduce the shrinkage ratio of the casting. Then orthogonal experiments were conducted on three process parameters that affected the casting forming quality: pouring temperature, pouring speed and shell preheating temperature. And the optimal scheme A1B2C2 was obtained: the preheating temperature of the shell was 1 050 °C, the pouring temperature was 1 500 °C, and the pouring speed was 450 mm/s. The process quality and production efficiency of the product were improved obviously by the optimized process parameters.

Key words:

lifting arm; investment casting; gating system; ProCAST software; orthogonal experiment