

基于 ProCAST 的汽车轮毂铸造模拟

李云帅¹, 朱小倩², 林文华², 沈明杰²

(1. 陕西科技大学材料科学与工程学院, 陕西西安 710021; 2. 陕西科技大学机电工程学院, 陕西西安 710021)

摘要: 在SolidWorks三维建模基础上, 利用ProCAST软件对镁合金轮毂的充型与凝固过程进行了数值模拟, 研究了温度场、流场、应力场对铸件的影响规律, 预测了缺陷的位置和种类。基于模拟结果, 对模具温度进行了调整, 并增加了冒口和外冷铁。工艺优化后模拟结果显示, 冒口和外冷铁的增加有助于减少浇注过程中出现缩孔缩松缺陷, 有效避免热节在重要部位的产生, 提高了铸件的质量。

关键词: 镁合金; 轮毂; 重力铸造; 数值模拟; 工艺优化

如今, 汽车已经成为普遍的交通工具, 虽为人们的生活带来了极大的便利, 但同时也对能源带来了极大的挑战, 为了解决能源消耗问题, 车辆轻量化成为了一个必然的发展趋势^[1-4]。镁作为最轻的结构金属之一, 其密度是 1.74 g/cm^3 , 比铝轻35%, 比钛轻65%^[5]。因此, 在不影响车辆综合性能降低的前提下, 用镁合金来铸造汽车轮毂成为一种减少能源消耗的重要手段^[6]。

铸件在铸造过程中除受金属液体流动状态的影响外, 还受凝固过程的影响^[7]。近年来, 通过模拟试验来对铸件进行分析, 并根据模拟结果来进行优化设计已经引起了许多学者的关注。邱克强^[8]等人通过ProCAST模拟软件对镁合金轮毂的充型和凝固过程进行模拟分析, 从而预测镁合金轮毂低压铸造过程中可能产生的缺陷, 通过改进工艺进而改善铸件的质量。Lee^[9]等人根据模拟结果, 分析缺陷产生原因, 对铸件进行了冒口与外冷铁的优化设计, 结果发现能够有效减少缩孔、缩松缺陷。马联合^[10]等人通过合理设计铸件的浇冒系统, 发现铸件的内部质量得到了大幅度提升。根据已有的研究可以发现, 冒口与外冷铁的优化设计能够减少铸件缺陷, 提高铸件的品质。

通常, 数值模拟方法有助于研究人员更好地理解与分析铸件在铸造过程中金属液体在模具型腔内的充型和凝固过程, 并预测缩孔缩松等缺陷, 对铸件工艺调整和控制具有重要的意义^[11-12]。本研究以汽车附件轮毂作为研究对象, 利用SolidWorks软件对铸件及金属型进行结构建模, 并通过ProCAST数值模拟技术改进传统轮毂的浇注系统, 有效消除铸造过程产生的缺陷, 旨在获得高品质铸件。

1 镁合金轮毂铸造的工艺方案

1.1 几何模型及网格划分

运用SolidWorks软件对铸件及浇注系统进行三维实体建模和模具设计, 并对整体结构进行了调整和简化, 获得仿真的几何结构^[13]。图1所示为镁合金轮毂的铸件及浇注系统的三维视图。考虑到镁合金铸造过程中易氧化的特点, 选择底注式浇注系统。

三维实体设计与建模后, 使用ProCAST自带的Mesh模块进行网格划分。表1为模块网格划分情况。

1.2 铸造材料参数

AZ91D合金耐腐蚀性、抗冲击性较为优越, 适合汽车轮毂用。表2为AZ91D合金

作者简介:

李云帅(1996-), 男, 硕士生, 主要研究方向为镁合金及其复合材料的强韧化。E-mail: liyunshuaiyy@163.com

通讯作者:

沈明杰, 男, 副教授, 博士, 硕士生导师。电话: 13659191300, E-mail: smjiekaka@163.com

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)

05-0547-05

基金项目:

国家自然科学基金委青年项目(51701108); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JQ-778)。

收稿日期:

2019-09-19 收到初稿,
2020-01-19 收到修订稿。

的热力学参数。

采用金属型重力铸造工艺成形，金属铸型材料为H13钢。H13钢是使用最广泛和最具代表性的热作模具钢种，同时H13钢的铸造和切削加工性能优良，热变形影响较小，适合作为AZ91D汽车轮毂铸件用铸型材料。模具的初始温度设为300℃，镁合金的浇注温度700℃，浇注速度为1.4 kg/s。一般情况下，选择空冷作为模具与外界的传热方式。

1.3 铸造工艺参数

镁合金铸件的浇注时间基于经验公式(1)确定。

$$\tau = S^3 \sqrt{\delta G} \quad (1)$$

式中： S 为系数，与铸件材质有关。镁合金的 S 一般取2； δ 为铸件壁厚，本次铸件主要壁厚为10 mm； G 为铸件重量。

根据公式(1)计算可得，本铸件浇注时间 $\tau = 8.8$ s。

通常使用 h 来表示界面换热系数，其表达式见式(2)。

$$h = \frac{q}{\Delta T} \quad (2)$$

式中： q 为热流密度， W/m^2 ； ΔT 为金属-模具界面的温度差， K 。本研究中，铸件和铸型的接触截面为CONICT，换热系数为500~750 $W/(m^2 \cdot K)$ 。此外，在金属型重力铸造过程中，重力加速度对整个充型过程的影响是很显著的。将重力设为 Z 轴负方向，大小为 $9.8 m/s^2$ ，从而达到自上而下的浇注效果^[14]。

2 铸造工艺优化

通过前期试验发现，随着充型过程的进行，合金液

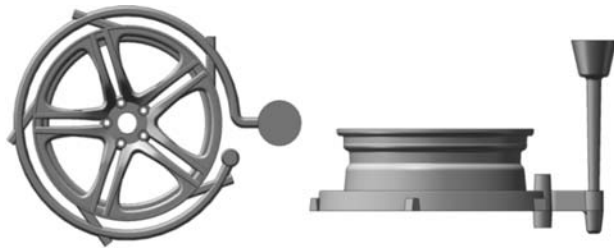


图1 轮毂及浇注系统3D视图

Fig. 1 3D view of hub and gating system

表1 模型网格划分

Table 1 Model meshing

网格类型	数量
1D	-
2D (面网格)	127 894
3D (体网格)	3 547 235

在轮辋液面存在一些波动，合金液与空气的接触面积增大，此时容易出现卷气的现象，通常与浇注温度相关。适当降低浇注温度能够有效地防止液面波动发生。

利用Viewer模块的CUT OFF功能选取两个关键环节进行观察，从图2a可以发现轮辐处温度还处于固相线以上时，轮辋区域已经开始凝固，这表明浇注系统的金属液不能及时提供补缩，不满足本研究对轮毂设计时采用的由上而下、由外而内的顺序凝固原则。如图2b所示，从观察孤立液相区的分布可以看出，辐条中间较细的部分提前凝固，中心安装盘位置得不到及时的补缩，导致轮毂中心部位产生热节，引发缩松缩孔缺陷。基于上述铸件的初步模拟方案与结果，需要对产品的设计和模具的冷却方案两方面进行优化与改进。

表2 AZ91D合金的热力学参数和性能

Table 2 Thermodynamic parameters and properties of AZ91D alloy

熔点/℃	密度/($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	热导率/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
595	1.82	45	250	7	72



(a) 轮辋部位

(b) 轮辐部位

图2 孤立液相区分布图

Fig. 2 Distribution of isolated liquid phase zone

2.1 模具温度的优化

由于镁合金熔体浇注温度范围较小(688~718 ℃),本铸件在浇注过程中只能通过改变模具温度(268~410 ℃)来改善铸造工艺。为了研究模具温度对铸件的影响,采用单一变量的原则设置试验参数。浇注温度选为688 ℃,浇注速度选为1.4 kg/s。

从图3a、b可知,当模具温度在360 ℃时,铸件的温差范围较小,能保证铸件的品质。模具温度过高时,会使大量气体进入合金液中,而温度过低时,则铸件不同部位的温差比较大。

仅通过改变模具温度,铸件从充型到凝固的整体时间变化如表3所示。可知,模具温度越高,其冷却速率越慢,导致凝固时间延长,时间成本增加。因而,结合温度场、充型与凝固模拟结果,本研究中模具温度选取360 ℃。

2.2 冒口与外冷铁的设计

基于前期模拟结果,对浇注系统进行了相应的改进。在铸件关键热节位置增加了明冒口的同时,为了实现从上到下、由外到内的凝固顺序,在轮毂中心安装面放置了外冷铁,且在轮辐位置设计了间接外冷铁。本次铸件所选择的外冷铁材料是铸铁,厚度一般为被激冷部位铸件厚度的0.8~1倍。此外,还根据前期模拟的速度场,对浇注系统进行了一定调整。如图4所示,新的浇注系统增设了冒口(黑色部分)、冷铁(浅灰色部分),并对内浇道与铸件的接入口进行了相应的调整。

3 优化工艺后的模拟分析

3.1 充型过程模拟分析

图5为充型过程中不同充型率的充型模拟结果。从图5a中可以发现合金液是由上至下逐渐充满整个轮毂,液面的流动状态较为平缓,说明改进工艺的各组元设计是合理的。

由于模具初始温度为360 ℃,浇注的金属液温度为688 ℃,铸件的温差范围较小,能够避免金属液的飞溅以及紊流产生的氧化。因此,在充型过程中可以发现整体充型平稳,且未发现欠浇或充不满等不良现象,并且有效地避免了卷气。模具温度的优化能够有效提高铸件的质量并同时降低成品缺陷率,大幅度提高铸件组织的致密性,极大减少了缩松缩孔等缺陷,获得力学性能良好的铸件。此外,充型过程中整体温度分布更加均匀,未发现温度集中点,这得益于模具优化温度(360 ℃)的选择。

3.2 温度场分析

为了更好地了解工艺优化后各部分温度变化速率,且确定是否顺序凝固,在铸件几个典型的部位选

取了不同的点,测量这些区域的温度变化,将其绘制成曲线。图6a是在铸件上所取点的空间分布图,而6b是各点的温度随时间变化曲线。从图6b中我们可以发现,不同区域冷却速率的大小为B>D>C>A>E。铸件最后凝固的区域为冒口部分,说明对模具温度的设置和冷铁的外加设计是有效可行的。

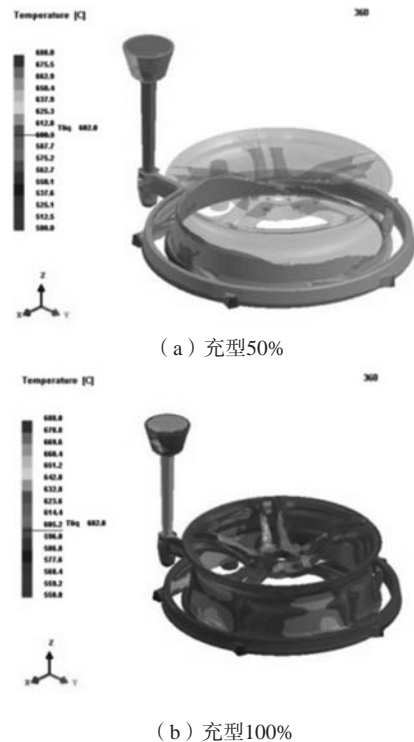


图3 360 ℃下铸件的温度场分布图

Fig. 3 Temperature field distribution of castings at 360 ℃

表3 不同模具温度的充型、凝固时间
Table 3 Filling and solidification time of different mold temperatures

模具温度/℃	充型、凝固时间/s
280	263
320	324
360	413
400	929

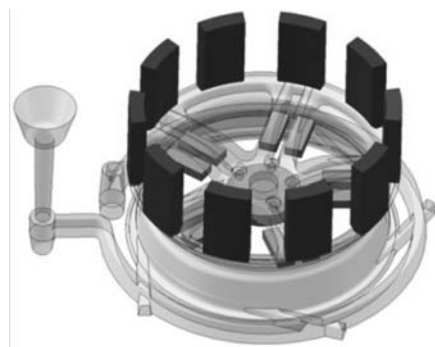


图4 优化后的浇注系统设计
Fig. 4 Optimized gating system

3.3 孤立液相区模拟分析

ProCAST自带的Fraction solid分析功能可以更加直观地了解凝固顺序。本研究选取两个关键环节观察,如图7所示。通过图7a了解到铸件从中心安装盘区域开始凝固。从图7b可以看出轮槽(壁厚最小)先于轮辋凝固,但是轮辋可以获得冒口附近金属液的补缩,提高轮辋处的质量。

铸件是从中心安装盘部分开始凝固,而金属液可以从该未凝固的通道通过,从而未出现完全孤立的液相区。轮辋虽然冷却较慢,但冒口的设计能够将凝固过程中的热量集中起来,它的存在能及时补缩。从而可知,轮毂在铸造过程中能实现由上而下、由外而内

的冷却顺序,有效消除铸件缩松缩孔现象,提高近终型轮毂的质量。

3.4 应力场模拟分析

为了更加全面地分析本次成形制件的质量,不仅对温度场、流动场进行了分析计算,还对应力场进行了模拟,通过等效应力分布图,评判本次设计的轮毂质量。从图8的等效应力分布可以看出,将模具的预处理设置为360℃后可以发现,铸件的关键连接节点处于低应力状态,未出现较大的应力集中现象。由此得知,通过优化模具温度有助于获得结构强度更好的轮毂。

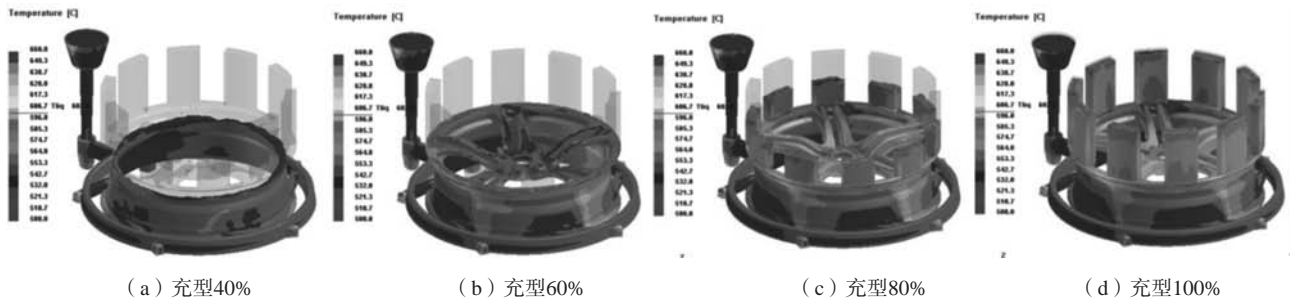
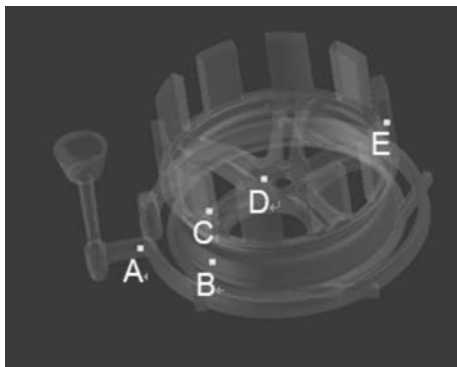
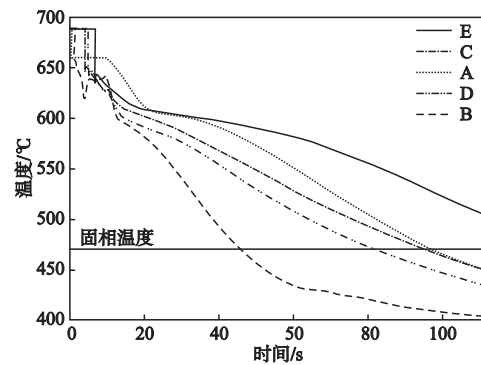


图5 充型过程
Fig. 5 Filling process



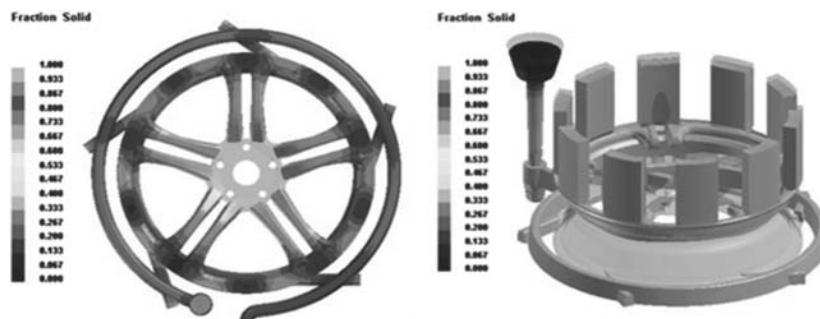
(a) 所取各点空间分布



(b) 铸件典型部位温度变化曲线

图6 温度场分析图

Fig. 6 Temperature field analysis diagram



(a) 安装盘处凝固示意图

(b) 轮辋处凝固示意图

图7 孤立液相区分布图

Fig. 7 Distribution diagram of isolated liquid phase zone

4 结论

(1) 通过对AZ91D合金汽车轮毂的模拟,发现在浇注温度为688℃,模具温度为360℃左右,充型速度约为2 kg/s条件下浇注,能有效改善充型时温度场分布,减少缩孔缩松等现象。

(2) 通过模拟验证了在铸件中设置外冷铁可转移铸件缺陷。

(3) 对镁合金轮毂铸件合理布置明冒口既能改善排气还能有效减少铸件的缩孔缩松,使铸件的质量得到有效改善。

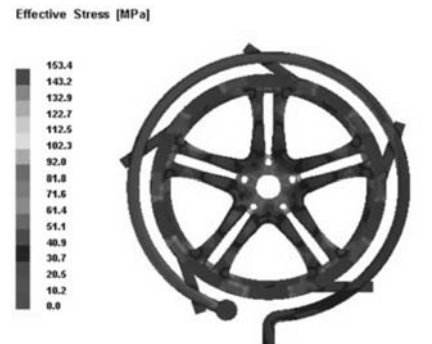


图8 等效应力分布图

Fig. 8 Equivalent stress distribution

参考文献:

- [1] 赵琛, 陈云霞, 李中兵. 轻量化材料镁合金在汽车上的应用 [J]. 汽车工艺与材料, 2011 (7): 54-57.
- [2] 陈虎. 镁合金的研究及其在汽车轻量化中的应用 [J]. 企业技术开发, 2009, 28 (11): 17-19.
- [3] LUO A A. Recent magnesium alloy development for automotive powertrain applications [C] //Materials Science Forum, 2003.
- [4] 郭玉琴, 朱新峰, 杨艳, 等. 汽车轻量化材料及制造工艺研究现状 [J]. 锻压技术, 2015, 40 (3): 1-6.
- [5] FRIEDRICH H, SCHUMANN S. Research for a "new age of magnesium" in the automotive industry [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117 (3): 276-281.
- [6] JOOST W J. Reducing vehicle weight and improving U.S. energy efficiency using integrated computational materials engineering [J]. JOM, 2012, 64 (9): 1032-1038.
- [7] 李双寿, 金鑫焱, 唐靖林, 等. 铸造镁合金轮毂研究应用现状 [J]. 特种铸造及有色合金, 2005 (z1): 60-63.
- [8] 邱克强, 王磊, 刘彬, 等. 镁合金汽车轮毂低压铸造数值模拟 [J]. 铸造, 2011, 60 (12): 1214-1217, 1221.
- [9] LEE W M, ZIKRY M A. Modeling the interfacial plastic strain incompatibilities associated with dispersed particles in high strength aluminum alloys [J]. Acta Materialia, 2012, 60 (4): 1669-1679.
- [10] 马联合, 巩红涛, 高磊. 基于ProCAST的支承壳体铸件铸造工艺设计及优化 [J]. 热加工工艺, 2018 (15): 101-103.
- [11] PENG Y H, LI D Y, WANG Y C, et al. Numerical study on the low pressure die casting of AZ91D wheel hub [J]. Materials Science Forum, 2005, 488-489: 393-396.
- [12] 周建新. 铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势 [J]. 铸造, 2012, 61 (10): 1105-1115.
- [13] 刘秀华. 基于ProCAST有限元模拟对衬板铸造工艺参数的优化 [J]. 铸造技术, 2019, 40 (7): 675-678.
- [14] 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.

Casting Simulation of Automobile Wheel Hub Based on ProCAST

LI Yun-shuai¹, ZHU Xiao-qian², LIN Wen-hua², SHEN Ming-jie²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 2. School of Mechanical and Electrical and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

Abstract:

Based on the three-dimensional modeling of SolidWorks, the filling and solidification processes of magnesium alloy wheel hub were simulated by the ProCAST software. The influences of temperature field, flow field and stress field on the castings were studied, and the position and type of defects were predicted. Based on the simulation results, the mold temperature was adjusted and the riser and external chills were added. The simulation results of optimized casting process show that the increase of riser and external chills is helpful to reduce the shrinkage cavity and shrinkage porosity in the pouring process and effectively avoid the occurrence of the hot spots in the important parts. Therefore, the casting quality can be improved.

Key words:

magnesium alloy; wheel hub; gravity casting; numerical simulation; process optimization