矿用平板车车轮铸件铸造过程模拟及优化

王成军¹,洪维立²,白东明³,张 涛⁴,段昌杰⁴

(1. 安徽理工大学人工智能学院,安徽淮南 232001; 2. 安徽理工大学机械工程学院,安徽淮南 232001;
 3. 金华职业技术学院浙江省农作物收获装备重点实验室,浙江金华 321016; 4. 淮南东华欧科矿山支护设备有限责任公司,安徽淮南 232072)

摘要: 以矿用平板车车轮为研究对象,运用ProCAST软件进行数值模拟,分析车轮铸件产生 缩松、缩孔的位置及原因。对初始浇注方案进行优化,通过添设冒口、增加外冷铁的方式进 行改进。结果表明,铸造工艺优化后,车轮铸件实现顺序凝固,热节部位消失,铸件缩松、 缩孔缺陷成功消除。经生产验证,车轮铸件的质量良好。 关键词: 矿用平板车;车轮铸造过程;数值模拟;工艺优化;铸造缺陷

车轮是矿用平板车重要零部件之一,其工作时需承受较大交变应力与弯曲应 力,此特殊工况导致常出现弯曲、裂纹、磨损等问题。因此,对车轮铸造成形工艺 提出更高的要求,其铸件不允许出现缩松、缩孔、冷隔等铸造缺陷。传统铸件生产 主要依靠技术人员实际工作经验,缺乏理论依据^[1]。利用计算机技术与铸造技术相结 合,运用数值模拟技术,可直观地显示铸件的缺陷所在,从而优化铸造工艺参数, 降低生产成本并缩短生产周期^[2-3]。

唐贵基^[4]等对铝合金轮毂结构进行有限元分析,研究固有频率及振型对轮毂疲劳 寿命的影响,验证轮毂最易失效部位。周正^[5]等对轮毂锻压进行研究,分析了3个不 同点上微观组织的变化。王伟^[6]等对轮毂进行数值模拟,研究了缩松、缩孔、温度场 等因素对轮毂铸件品质的影响。通过增设冷铁和保温圈的方法,改进铸造工艺。周 杰^[7]等对飞机轮毂进行数值模拟,提出毛压加预压加终压的成形工艺,并对工艺试验 结果的成形缺陷进行分析。

本文运用ProCAST软件,模拟车轮铸件的充型和凝固过程,利用模拟结果预测 车轮铸件产生缺陷的位置及大小并分析原因,对浇注系统进行优化设计,从而提高 车轮铸件的力学性能,改善车轮铸件质量。

1 车轮铸件工艺性能分析

1.1 模型建立

图1为某矿用平板车车轮的三维零件图,其轮廓外形尺寸为353 mm × 403 mm ×



图1 车轮三维零件图 Fig. 1 Three-dimensional parts diagram of the wheel

作者简介:

王 成 军(1978-), 男, 教授,工学博士,博士生 导师,主要从事智能机 械与机器人、多维振动铸 造理论与技术等方面的科 研与教学工作。E-mail: cumt1279@163.com 通讯作者: 洪维立,男,硕士生。E-maik 976215233@qq.com

中图分类号:TG26 文献标识码:B 文章编号:1001-4977(2022) 05-0650-06

基金项目: 安徽省特支计划(AHTZ 202006-04);2019 安徽省 重点研究与开发计划项目 (201904a05020092)。 收稿日期: 2022-01-17 收到初稿, 2022-03-04 收到修订稿。



152 mm,车轮外圈壁厚为20 mm,车轮轮毂壁厚为 36 mm。运用SolidWorks三维软件建立车轮铸件浇注系 统的初始方案,如图2所示。车轮材质为ZG50Mn2,质 量为59.2 kg,采用砂型重力铸造。

1.2 车轮浇注系统设计

由于车轮为小型铸钢件,为矿用平板车车轮,载 重需求大,故在浇注和凝固过程中不允许出现缩松、 缩孔等铸造缺陷。因铸钢具有熔点高、流动性差、收 缩大、易氧化等特性,要求金属液快速、平稳充型^[8]。 根据分型面的设计原则,将分型面放在车轮中分面 上,此面也是加工面,铸件易取模。此铸件为大批量 生产的中小型铸钢件,采用半封闭式浇注系统,以加 强挡渣能力,采用一箱一件的工艺方案。根据车轮铸 件结构特点,设计合理的浇注系统可使其平稳充型, 减小对型腔的冲刷及产生卷气的可能性。其各浇道截 面比例为: $\sum A_{\pm}: \sum A_{\pm}: \sum A_{\pm}=1.2:0.8:1$,计算求得 内浇道总截面积为19.4 cm²,因设计的内浇道为三个, 故一个内浇道截面积为6.5 cm²,则直浇道和横浇道总 截面积分别为23.3 cm²、15.5 cm²,确定的各浇道大小 如图3所示。

2 铸件数值模拟及分析

2.1 工艺参数设置

由国标JB/T 6402—2006^[9]可知,所选车轮模型材 料ZG50Mn2的化学成分如表1所示,其力学性能如表2



所示。

将表1中铸钢的化学成分导入到Thermal-Calc软件 中使用Scheil模块进行计算,计算得到ZG50Mn2的相 图,如图4所示。可以看出,固相线温度为1 397 ℃, 液相线温度为1 484 ℃。通常铸钢件的浇注温度一般高 于液相线温度40~50 ℃^[10]。考虑到该铸件结构复杂, 钢液流动容易受到阻碍,选取浇注温度为1 600 ℃。将 数据导入JMatPro软件得到ZG50Mn2的密度及热导率等 与铸造密切相关的热物性参数,如图5所示。将模型导 入ProCAST的Visual-Mesh模块,对其进行网格划分, 得到二维网格数量为110 566,三维网格数量为1 843 950。设置砂型温度为20 ℃。砂型材料选用树脂砂。通 过铸钢件的有效浇注时间计算公式算出需要浇注时间为 7.8 s。设置车轮与砂箱的换热系数为500 W/(mm²·K)。 铸型与环境冷却方式设置为空冷。

2.2 模拟结果分析

对车轮铸件进行数值模拟,由于车轮内部复杂, 外部观察无法做出判断,故对结果进行切片处理,得 到如图6所示的温度场图像。由图6a可知,铸件周围温 度开始降低,内部温度处于较高状态,与外部产生较 大温差,铸件整体处于液态收缩状态;由图6b可知, 铸件外围温度继续下降,逐步向内部扩展,车轮轮毂

表1 ZG50Mn2化学成分 Table 1 Chemical composition of the ZG50Mn2 w_B/%

С	Si	Mn	Р	S
0.45~0.55	0.20~0.40	1.50~1.80	≤0.030	≤0.030

表2 ZG50Mn2室温下的力学性能 Table 2 Mechanical properties of the ZG50Mn2 at room temperature

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
445	785	18	37







图5 ZG50Mn2的密度和热导率随温度变化曲线 Fig. 5 Curves of density and thermal conductivity of the ZG50Mn2 with temperature





与边缘温差更加明显;由图6c可知,铸件外圈壁温度 已达到固相线以下,开始凝固,内部仍处于较高温 度;由图6d可知,铸件外部绝大部分位置已经凝固, 车轮轮毂部位已经得不到金属液的补缩,铸件内部极 高,且中心位置没有钢液补充,致使铸件中心部位产 生大量热节,导致铸件产生缩松、缩孔等铸造缺陷。

如图7所示为铸件分别在凝固分数为60%和90%时的孤立液相区图,图7a中可以明显看出,铸件热节产



生的位置;图7b中的灰色区域为孤立液相区产生的位置。图8为车轮铸件缩松、缩孔位置图,可以看出,车轮中心位置产生了大量的缩松、缩孔,其总体积为146.96 cm³,其中缩孔体积为100.55 cm³,占总体积的40.62%。铸件严重不合格,因此需要对铸件整体进行优化。

3 车轮铸件浇注工艺优化

由上述分析可知,由于车轮四周提前凝固,导



图8 缩松缩孔缺陷分布图 Fig. 8 Distribution image of the shrinkage defect



致车轮中心部位没有金属液补缩,产生缩松、缩孔缺陷。为了解决金属液不能及时补缩的问题,在车轮中 心部位增加冒口;由于铸件结构复杂,热节产生难以 避免,故在铸件中间增加冷铁,使其与冒口配合,提 高金属液的补缩效率。

3.1 冒口与外冷铁的设计

为了保证凝固期间金属液能顺利进行补缩,要确 保冒口的凝固时间大于或等于铸件的凝固时间^[11]。采 用模数法进行冒口计算,分別求得铸件的模数 $M_{\rm fff}$ = 1.173,冒口的模数 $M_{\rm ff}$ =1.55,满足关系式 $M_{\rm ff}$ > $f_1 \cdot M_{\rm fff}$,式中 f_1 为冒口的平衡系数,且 f_1 >1.2。进行冒口 补缩液量验算,带入公式($V_{\rm fff}$ + $V_{\rm fl}$) · $\varepsilon \leq V_{\rm fl}$ · η ,式中 ε 为凝固体收缩率, η 为冒口补缩效率。经计算,冒口 能够提供足够补缩液,铸件满足顺序凝固要求。本次 铸件材料为ZG50Mn2,是铸钢件,选取高碳钢作为外 冷铁的材料。优化后的浇注系统如图9所示。

3.2 工艺优化后模拟分析

通过上述方案对原浇注系统进行优化,得到优化后的浇注系统,对其进行数值模拟分析。在原有设置参数不变的情况下,分别设置冷铁与砂箱换热系数为500 W/(mm²·K),冷铁与铸件的换热系数为

2 000 W/(mm²·K)。得到如图10所示的温度场图像。 由图10可以看出,车轮在外冷铁和冒口的作用下,基 本实现由上到下的顺序凝固。由图10a可知,车轮整体 温度较高,边缘位置温度下降,低于液相线温度;由 图10b可知,车轮四周开始凝固;由图10c可知,在冷 铁的作用下,铸件由下而上,由外而内逐渐凝固;由 图10d可知,车轮外圈基本凝固,车轮轮毂受到冒口 金属液的补缩以及冷铁的作用未出现热节和孤立液相 区。图11为车轮铸件不同区域温度图。由温度分布曲 线图可知,C点即冒口位置的温度最高,说明冒口最后 凝固。

如图12为铸件优化后的缩松、缩孔分布图。由



图9 优化后的浇注系统 Fig. 9 Optimized gating system







图12 优化后铸件缩松缩孔分布图 Fig. 12 Distribution of the shrinkage and porosity of the casting after optimized

图12可以看出,车轮铸件未出现缩松、缩孔的铸造缺陷,说明通过增加冒口和增加外冷铁的方式能够有效改善铸件在铸造过程中的缺陷,通过外冷铁有效避免 了热节的产生,提高了铸件的致密性。

4 生产验证

从上述模拟结果可以看出,通过对矿用平板车车 轮浇注系统的优化,使车轮铸件缺陷成功消除。将改 进后的铸造工艺进行生产验证。经过实际生产验证, 该铸件组织和力学性能均满足要求。合格的产品如图 13所示。



图13 合格产品图 Fig. 13 Qualified product photos

5 结论

(1)在矿用平板车车轮原浇注系统基础上,增设 冒口和添加外冷铁,有效避免了铸件热节的产生。通 过冒口对铸件金属液的及时补缩,消除了铸件缩孔、 缩松铸造缺陷,有效提高了铸件的致密性。冒口和冷 铁的共同作用,实现了铸件由下而上、由外而内的顺 序凝固,提高了铸件生产质量。

(2)通过对改进后方案进行生产验证,获得铸件 的组织和力学性能均满足要求,证实了该方案有效可 行。

参考文献:

- [1] 范李鹏,姬艳硕,余国康,等.大型铝合金基座铸件数值模拟研究[J].铸造技术,2021,42(10):856-860.
- [2] 史东丽,曹松,朱宇,等.高速列车牵引支架的铸造工艺优化 [J].铸造,2021,70(12):1476-1480.
- [3] 李云帅,朱小倩,林文华,等.基于ProCAST的汽车轮毂铸造模拟 [J]. 铸造,2020,69 (5):547-551.
- [4] 唐贵基,喻自力,王晓龙,等.基于试验对比的汽车轮毂动特性及疲劳寿命研究 [J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版),2021,41
 (6):351-356.
- [5] 周正,杨莎,王天琪.铝合金轮毂锻压成形工艺及组织仿真[J].机械设计,2021,38(S2):205-208.
- [6] 王伟,崔晓明,石博,等.铝合金轮毂重力铸造过程数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2019,39(12):1298-1301.
- [7] 周杰,李世山,张谦,等.复杂深筒铝合金轮毂锻件精密成形工艺及模具技术[J].锻压技术,2021(9):270-277.
- [8] 王成军,余汉伟,张子鹏.采煤机齿轨铸件铸造过程模拟及工艺创新设计 [J].煤炭科学技术,2020,48(2):164-170.
- [9] 娄延春.铸造手册: 第2卷铸钢 [M]. 3版.北京: 机械工业出版社, 2014.
- [10] 陈军利. 铸钢件浇注温度计算与控制 [J]. 铸造, 2015, 64(1): 80-82.
- [11] 陈淑惠. 铸件冒口设计的原则及方法 [J]. 科技创新导报, 2008(27): 100-102.



Simulation and Optimization of Casting Process of Mining Flatbed Wheel Casting

WANG Cheng-jun¹, HONG Wei-li², BAI Dong-ming³, ZHANG Tao⁴, DUAN Chang-jie⁴

(1. College of Artificial Intelligence, Anhui University of Technology, Huainan 232001, Anhui, China; 2. College of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China; 3. Key Laboratory of Crop Harvesting Equipment Technology of Zhejiang Province, Jinhua Polytechnic, Jinhua 321000, Zhejiang, China; 4. Huainan Donghua European Mine Support Equipment Co., Ltd., Huainan 232072, Anhui, China)

Abstract:

Taking the wheel of mining flatbed car as the research object, ProCAST software was used to carry out numerical simulation to analyze the position and cause of the shrinkage in wheel casting. The initial pouring scheme was optimized and improved by adding risers and external chills. The results showed that after optimization of the casting process, the wheel casting achieved sequential solidification, the hot spot disappears, and the defects of shrinkage and porosity were eliminated successfully. The quality of wheel castings has been verified by production.

Key words:

mining flatbed car; wheel casting process; numerical simulation; process optimization; casting defects