

曳引轮铁型覆砂铸造过程温度场数值模拟与精度提升

胡学帅¹, 汪东红², 吴文云¹, 朱国³, 夏小江³, 邱仲华⁴, 黄列群³, 疏达²

(1. 上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620; 2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室, 上海 200240; 3. 浙江省机电设计研究院有限公司, 浙江杭州 310051; 4. 湖州鼎盛机械制造有限公司, 浙江湖州 313000)

摘要: 铁型覆砂铸造过程中工艺参数难控制、传热复杂, 为了提升温度场数值模拟计算精度, 提出“精确模型—精确工艺参数”的数值模拟前处理方法: 根据本工艺特有的模型变厚度工艺设计, 对铁型、覆砂层、铸件、浇注系统等进行精确几何建模, 使用ProCAST数据库计算材料热物性参数, 采用ProCAST的反算模块反向求解得到温度函数的界面换热系数, 将随温度变化的参数代替恒定值参数作边界条件。本文以某型曳引轮为例, 针对优化浇冒系统后仍存在的细微缺陷, 使用上述精确前处理方法, 铸件内部缩松、缩孔缺陷及孤立液相区消失, 冒口处缩松缩孔体积减少5.2%, 经实际生产验证模拟计算精度获得提高。

关键词: 铁型覆砂; 温度场模拟; 工艺优化; 界面换热系数; 反算优化

作者简介:

胡学帅(1996-), 男, 硕士, 主要研究方向为铸造数值模拟。E-mail: xueshu@126.com

通讯作者:

汪东红, 男, 副研究员, 博士, 博士生导师。电话: 021-54748678, E-mail: wangdh2009@sjtu.edu.cn

中图分类号: TG249

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2023)10-1260-07

基金项目:

国家重点研发计划(2020YFB1710100, 2022YFB06800); 国家自然科学基金(51821001, 52074183, 52090042); 长寿命高温材料国家重点实验室开放基金(DECSKL202109); 材料成形与模具技术国家重点实验室开放基金(P2021-006); 浙江省重点研发计划(2021C01157, 2022C01147)。

收稿日期:

2022-07-18 收到初稿,
2023-07-25 收到修订稿。

铁型覆砂铸造工艺是一种新型工艺技术, 该工艺很好的兼具和继承了金属型与砂型铸造的优点^[1]。金属铁型使得铸件冷却速度快, 晶粒细小, 组织致密, 铸型刚性大, 铸件变形量小。铸型内腔壁挂高硬度覆砂层, 可有效地调节凝固冷却速度, 防止白口组织产生。由于铁型覆砂的工装成本高, 调整困难, 采用铸造过程温度场的数值模拟, 可预测和分析铸件在凝固过程可能出现的缩松、缩孔等缺陷, 从而指导工艺改进, 降低工艺试验成本^[2]。但铁型覆砂铸造凝固传热过程复杂, 边界条件参数多, 提高温度场数值模拟的计算精度尤为关键。

近年来, 凝固数值模拟在铁型覆砂工艺上的应用研究以及界面换热系数反算优化的研究逐渐展开。清华大学梁作俭等通过建立凝固数值模拟的数学模型, 预测了球铁件曲轴的收缩缺陷^[3]。浙江机电院最早开始承担铁型覆砂铸造计算机模拟研究项目, 专门研发了铁型覆砂工艺球铁件数值模拟软件。黄列群、潘东杰等总结了铁型和覆砂层厚度对铸件凝固的影响规律。夏小江、朱国也曾对电梯制动轮进行了凝固模拟和工艺优化^[4-5]。隋大山、Meneghini等对铝合金在砂型铸造中通过反算法求解了界面换热系数优化温度场模拟^[6-7]。但在铁型覆砂工艺上通过反算数据优化温度场模拟的相关研究稀少。

当前铁型覆砂铸造过程数值模拟中存在以下两点不足: 一是在模型建立上, 铁型覆砂工艺模型常简化为砂箱和铸件或单一厚度的铁型及覆砂层。二是铁型覆砂铸造工艺特殊、传热复杂, 将材料热物性参数、界面换热系数设定为恒定值。以上数值模拟前处理方法将导致模拟结果与实际生产偏离。本文以某型曳引轮为例展开了提升铁型覆砂铸造过程数值模拟精度的研究。

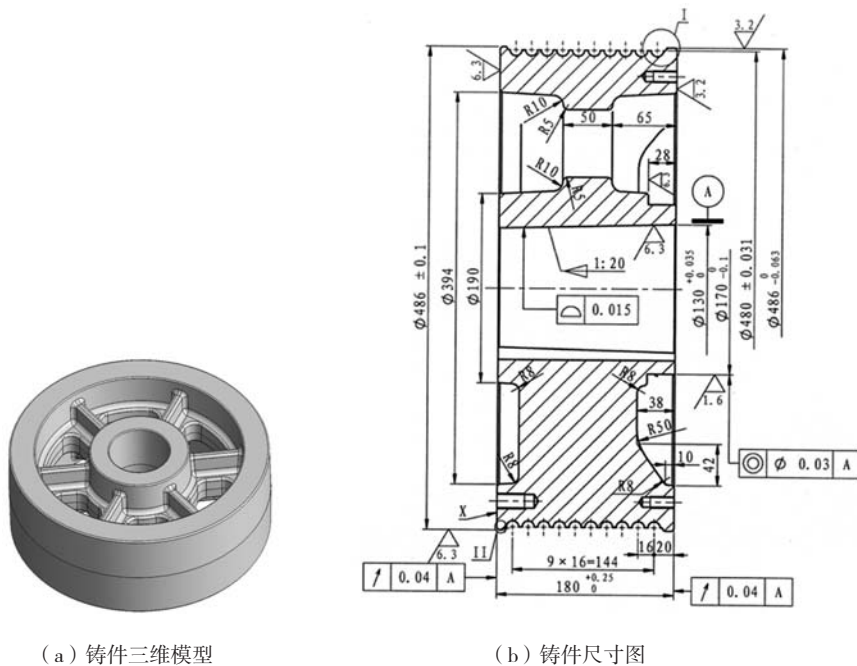
1 传热分析与工艺参数

1.1 铸件结构及技术要求

铸件曳引轮重约122 kg, 材质为QT700-2, 是电梯曳引机中传递曳引动力的装

置。在运行工作中不仅要承受巨大的动静载荷，还需要具有耐冲击、耐磨损等性能要求。铸件要求表面光洁，无裂纹、缩松、缩孔、夹砂等缺陷。铸件轮廓最大直径为486 mm；高度为180 mm；外圈壁厚为46 mm；

内圈壁厚为30 mm，六根连接轮辐最大宽处120 mm，厚50 mm，外轮缘与轮辐连接处最易产生热节，整体壁厚较为均匀，铸件结构如图1所示。



(a) 铸件三维模型

(b) 铸件尺寸图

图1 铸件三维模型及尺寸图

Fig. 1 3D model and dimension drawing of casting

1.2 铁型覆砂铸造传热特点与分析

铸件凝固过程是一个非稳态的热传导过程，可用傅里叶导热微分方程来描述^[8]，也是凝固温度场数值模拟的计算依据，其方程表达式为：

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + q_v \quad (1)$$

式中： ρ 为金属密度， kg/m^3 ； c_p 为材料比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ； λ 为材料热导率， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ， ρ 、 c_p 、 λ 为材料热物性参数，随温度变化而变。 T 为温度变量， $^\circ\text{C}$ ； q_v 为结晶潜热， J/kg ； t 为时间变量， s ； x 、 y 、 z 为坐标分量， m 。其中左边为热积蓄项，右边为3个导热项及潜热项。

铁型覆砂铸造传热过程较砂型铸造更为复杂，由于铸件与铁型之间存在一层覆膜砂，铸件-覆砂层-铁型三者之间组成了一个瞬态变化的热交换体系^[9]。若不考虑热阻且忽略间隙的影响，温度场简化模型如图2所示。当液态金属浇入铸型后，铁液温度不断下降，覆砂层和铁型温度逐渐上升，热量通过覆砂层再由铁型向大气中传递，覆砂层承载了传热过程中主要的热量。由示意图可以看出覆砂层的内外表面出现较大的温度梯度，因此铁型覆砂铸造工艺中影响铸件凝固冷

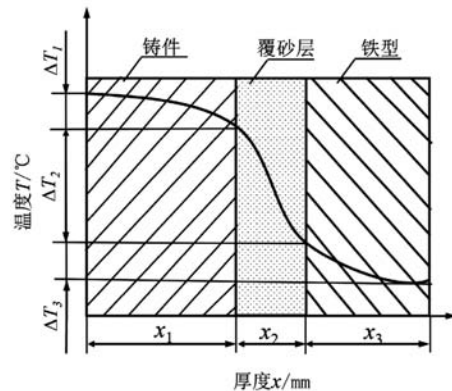


图2 铸件-覆砂层-铁型断面的温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of casting, sand coating and iron mold section

却最大的因素是覆砂层厚度，其次是铁型。铁型覆砂铸造呈现出的传热规律是铁型越厚，覆砂层越薄，冷却速度越快；反之亦然。

铸件与铁型之间的覆砂层材料中含有树脂，会在浇注过程的高温环境中燃烧产生气体，在覆砂层的表面形成气隙，并且在凝固冷却过程中由于铸件的收缩及球铁石墨化膨胀使得间隙再次发生变化。因此提出“铸件/覆砂层”界面换热系数值应是一个关于温度变

化的量。

1.3 精确建模与参数设定

以上热交换特点已被黄列群等研究学者通过实验证实^[10]。为了调控凝固顺序,对热节部位的铁型和覆砂层进行精确变厚度设计,使铸件的凝固和冷却在较为理想的条件下进行,减少铸造缺陷提高铸件质量。

几何建模精度直接影响有限元网格的质量,从而

密切影响着数值模拟的准确性。用三维软件建立铸件、浇冒系统、排气针、覆砂层及铁型的精确模型。铁型和覆砂层模型厚度参数如下:如图3所示,铁型型腔大部分壁厚为30 mm,浇冒系统处铁型壁厚减少至20 mm。铸型中的覆砂层厚度平均厚度为10 mm,轮缘与轮辐连接处形成的厚大部分容易产生热节,此处覆砂层减薄至为5~6 mm。同时加厚浇冒口处的覆砂层至15~18 mm,使其最晚凝固。

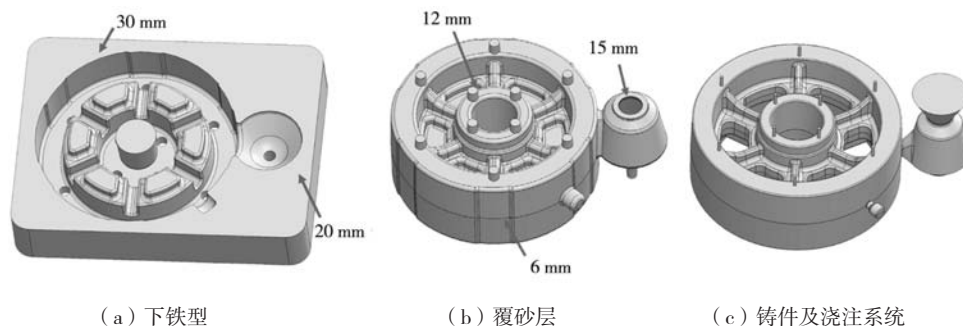


图3 工艺模型的变厚设计

Fig. 3 Thickening design of process model

将三维模型导入数值模拟软件中,网格划分后进行相关边界条件设定。铸件材质设置为QT700-2;覆砂层材料为酚醛树脂砂;铁型材质为HT250,铁型与覆砂层预热温度200 ℃,浇注温度设置为1 350 ℃;浇注时间根据公式计算为16 s;铸件/覆砂层界面换热系数分别设定为1 500 W/(m²·K)和图10中的反算值。使用ProCAST材料数据库计算铸件、覆砂层、铁型材料随温度变化的热物性参数,如图4和表1、表2所示。

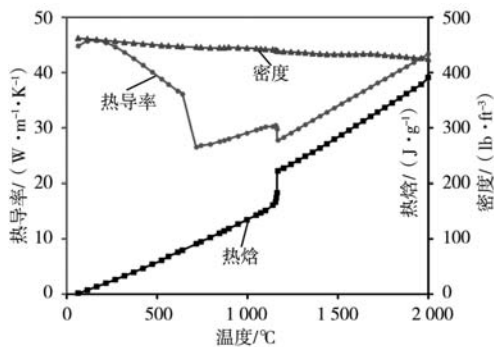


图4 QT700-2热物性曲线

Fig. 4 Thermophysical properties curves of QT700-2 material

2 模拟分析与浇冒系统优化

采用初始浇注方案铸件的充型过程模拟如图5所示。铁液首先从浇道进入覆砂层型腔,在1.76 s充满浇注系统后从内浇道进入轮缘底面,3.98 s和10.06 s左右

分别开始和结束对轮辐部位的充型,约在13.98 s金属液基本充满了整个型腔,铸件水平最高处的气针最后充型。初始的侧注式浇注方案从整体的充型过程来看,是一种自下而上缓慢充型的状态,充型速度较快,同时液面流动平稳未见铁液飞溅、紊乱等不良现象,因此后续的浇冒系统优化延续了这一工艺设计方向。

图6所示分别为18.87 s、126.30 s、255.80 s、691.05 s时的凝固状态,可见凝固状态并不均匀,铸件轮缘和轮毂的上下表层最先凝固,轮辐次之,然后是轮缘、

表1 覆膜砂热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of coated sand

项目	温度/℃					
	20	200	400	600	700	1 000
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.712	0.627	0.554	0.5	0.61	0.78
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	723	920	1 014	1 006	1 006	1 006
密度/(kg·m ⁻³)	1 590					

表2 HT250灰铸铁热物性参数

Table 2 Thermophysical parameters of HT250 gray cast iron

项目	温度/℃					
	30	200	600	1 000	1 400	2 000
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	41.15	43.22	35.79	28.59	31.65	42.67
热焓/(J·g ⁻¹)	5.088	72.76	320.8	562.8	1 069	1 601
密度/(kg·m ⁻³)	7 671	7 587	7 398	7 258	6 865	6 586

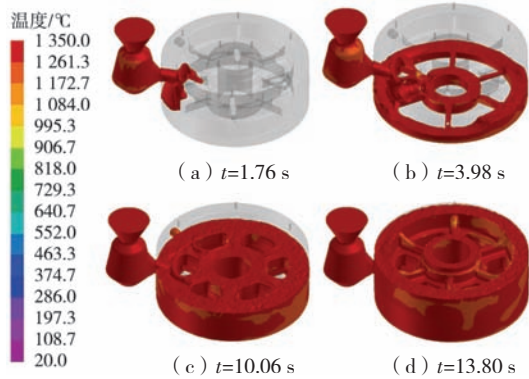


图5 曳引轮不同时刻的充型过程

Fig. 5 Filling process of traction wheel at different times

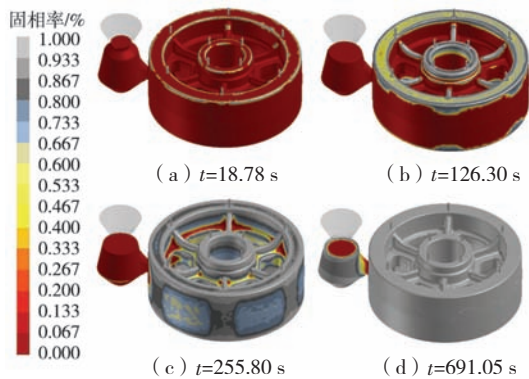


图6 曳引轮不同时刻的凝固顺序

Fig. 6 Solidification sequence of traction wheel at different times

轮毂的内部，最后是冒口。特别是在255.8 s时轮辐处固相率已达70%，此时认为金属液已失去流动性，但轮毂内部仍存在未凝固区并且已得不到外部轮缘金属液的补充，故此处将存在孤立液相区，大概率会产生缩孔、缩松现象。

255.80 s时的固相率低于70%的区域分布如图7a所示，缩松、缩孔缺陷分布如图7b所示，通过两图可知轮毂与轮辐连接处的厚大部分，因得不到补缩而形成孤立液相区及缩松、缩孔缺陷，验证了上述分析过程。

由于铸件壁厚差较大，在轮辐与轮缘的连接处存在厚大部位，初始浇注方案经凝固过程数值模拟后，发现铸件的石墨化膨胀量小于液态和凝固收缩量，不能实现完全的自补缩，单冒口式浇注方案补缩能力又不足，此处出现孤立液相区从而导致缩松、缩孔缺陷产生。因此调整补缩冒口、内浇道的尺寸和距离，加大补缩以消除内部缺陷^[11]，将浇冒系统优化为“三大一中”式，三维模型如图8所示。

根据图3所述的壁厚变化工艺设计方法，重新建立新浇冒方案的铁型、覆砂层模型，将其导入数值模拟软件中，边界参数设定不变，铸件/覆砂层界面换热系数取恒定值 $1\ 500\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。从图9a可以看出，优化浇冒系统后的缩松、缩孔缺陷分布有了明显的改善，铸件上仅有六处十分微小的缩松缩孔。绝大多数的缺陷分布在浇冒口处，缩松、缩孔总体积为 $192.03\ \text{cm}^3$ ，缩孔体积为 $19.12\ \text{cm}^3$ 。从图9b看出，优化浇冒系统后

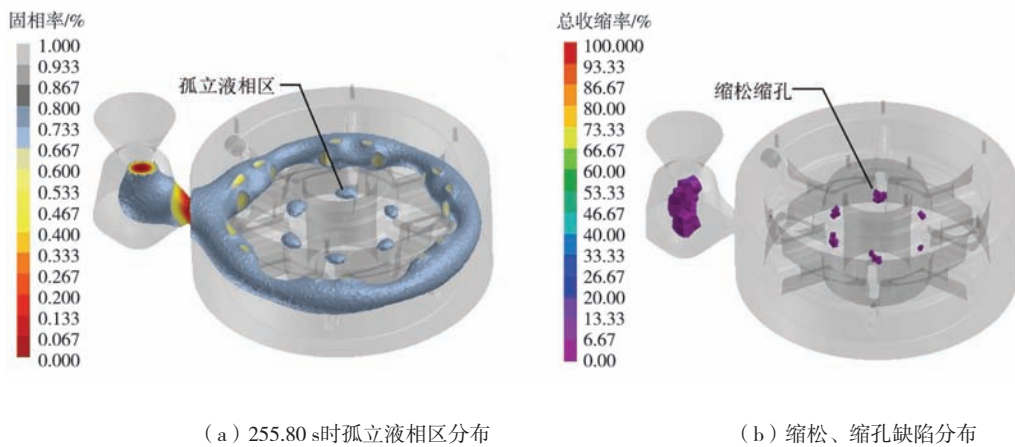


图7 轮毂处出现孤立液相区、缩松缩孔缺陷

Fig. 7 Isolated liquid phase area, shrinkage porosity and shrinkage cavity defects appear at the hub

外轮缘与轮辐衔接处存在十分微小的孤立液相区，分析原因可能是模拟计算精度误差引起的。

3 界面换热系数优化

铁型覆砂铸造传热复杂，温度场数值模拟中选用

恒定值界面换热系数难以实现精确预测缺陷的产生和分布^[12-16]。以实测温度曲线为反算基础，运用ProCAST反算求解模块对铸件/覆砂层的界面换热系数进行反向求解计算。选取 $400\ ^\circ\text{C}$ 、 $600\ ^\circ\text{C}$ 、 $800\ ^\circ\text{C}$ 、 $950\ ^\circ\text{C}$ 、 $1\ 150\ ^\circ\text{C}$ 、 $1300\ ^\circ\text{C}$ 为温度反算点，模拟参数仍取初始

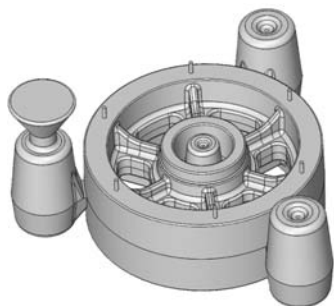
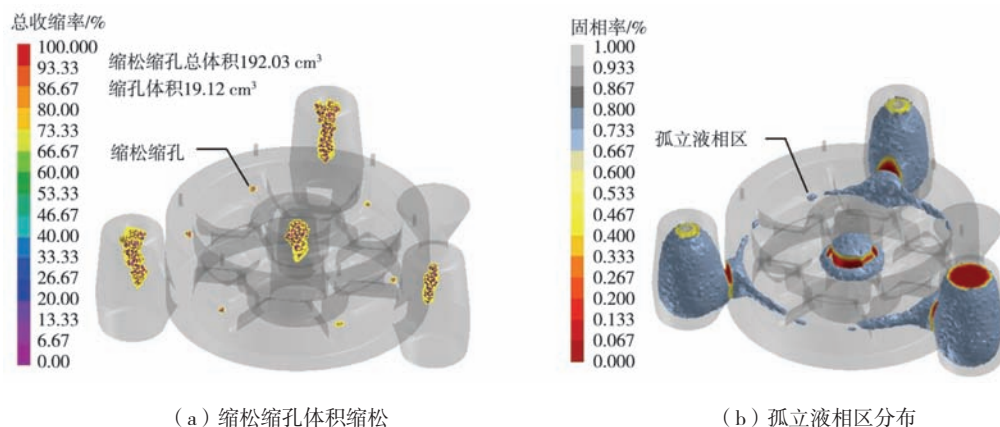


图8 “三大一中”式浇冒系统

Fig. 8 “Three major and one medium” pouring and caving system

值, 设定最大迭代次数 30、收敛公差5%, 经多次循环迭代结果如图10所示。从图10看出, 整体趋势是随着温度的升高, 铸件/覆砂层界面换热系数在不断的增大。

把以上反求得到的界面换热系数值, 与图4、表1、表2中同样随温度变化的铸件、覆膜砂和铁型的材料热物性值作为边界条件, 其他参数设置不变, 重新进行正向求解。图11是模拟结果中导出的温度曲线和实际温度曲线进行比较, 从图中可以看出, 铸件模拟计算温度略低于初始温度值, 覆砂层模拟温度稍高于初始值。但两种温度曲线整体趋势较为吻合, 偏差基



(a) 缩松缩孔体积缩松

(b) 孤立液相区分布

图9 使用恒定值换热系数的缩松缩孔体积及孤立液相区分布

Fig. 9 Volume of shrinkage cavity and distribution of isolated liquid phase region using constant heat transfer coefficient

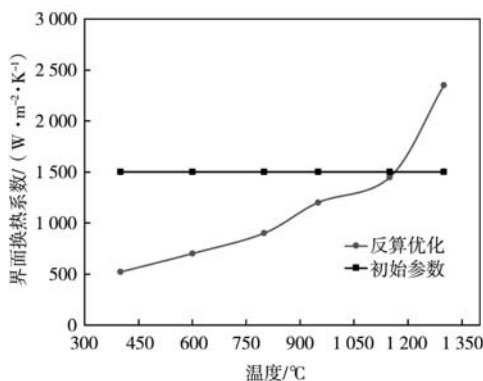


图10 铸件/覆砂层界面换热系数优化曲线

Fig. 10 Optimization curve of heat transfer coefficient at casting / sand coating interface

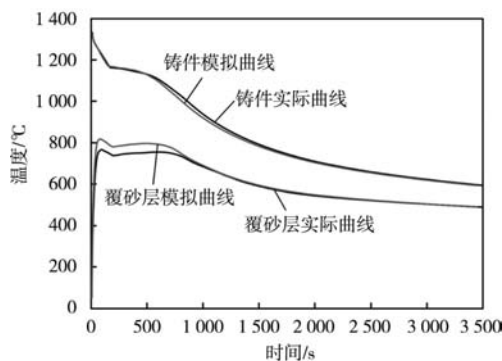


图11 模拟温度曲线与实际温度曲线比较

Fig. 11 Comparison between simulated temperature curves and actual temperature curves

本可以保持在3%以内, 且在3 000 s后基本重合。表明采用以上数值进行温度场模拟, 具有一定的准确性。图12为使用反算优化的界面换热系数进行模拟的缩松缩孔分布及体积情况, 铸件上无缩松缩孔现象, 缺陷全部集中在浇冒系统中, 其缩松、缩孔总体积为 182.04 cm³, 缩孔体积为13.86 cm³。与使用恒定值界面

换热系数的模拟结果相比, 缩松、缩孔总体积减少了5.2%, 缩孔体积减少了27.51%。分别选取了凝固过程中752.52、815.77、1297.27 s三个时刻, 从图13可以看到使用优化后界面换热系数的凝固模拟中未有孤立液相区产生。

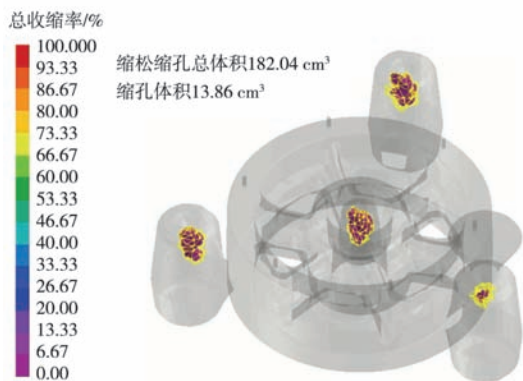


图12 使用温度函数界面换热系数的缩松缩孔体积
Fig. 12 Shrinkage cavity volume using interface heat transfer coefficient of temperature function

4 生产验证

上述优化后的铁型覆砂工艺设计已通过企业生产验证, 模拟结果与实际生产情况吻合, 如图14所示, 铸件经X射线检测未见缩松、缩孔等缺陷, 表明模拟结果准确、可靠。

5 结束语

(1) 铁型覆砂铸造由于铁型铸型刚度好, 适合球铁件的生产, 可充分利用石墨化膨胀发挥其自补缩特性, 但并非球体件采用本工艺均可实现无缺陷产生, 无冒口铸造。如本文中壁厚差较大的曳引轮铸件, 存在无法完全自补缩的孤立热节, 仍要考虑补缩问题。

(2) 提出一种新型精确建模方法, 将铁型覆砂铸

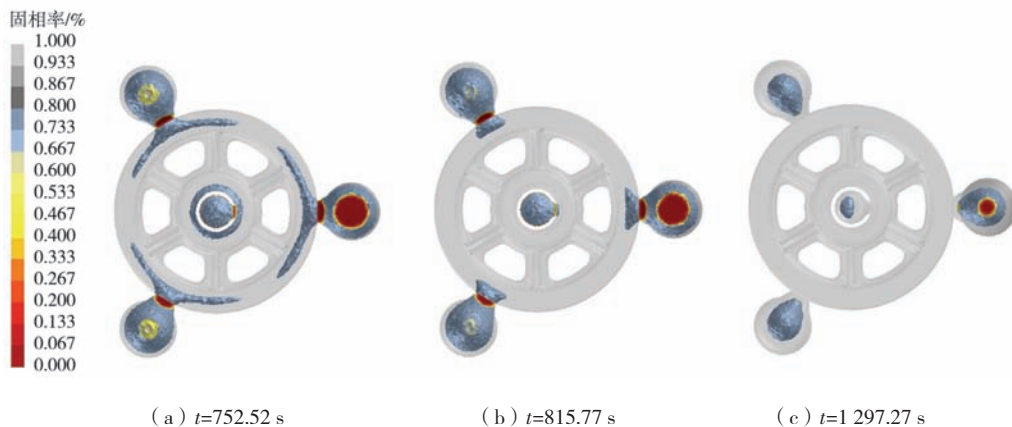


图13 使用温度函数界面换热系数未出现孤立液相区
Fig. 13 Using the temperature function interface heat transfer coefficient, there is no isolated liquid region



图14 实际生产的铸件
Fig. 14 Actually produced castings

造特有的铁型、覆砂层变厚度工艺设计, 运用到几何建模中。即浇冒系统处的覆砂层模型适当增厚, 铁型模型减薄, 孤立热节处模型情况反之。此方法为数值模拟的前处理提供精确实体模型, 通过提高模型精度从而提升模拟结果的准确性。

(3) 铸件/覆砂层界面换热系数的结论是随着温度的升高而增大, 将其反算优化值运用到温度场模拟中, 铸件浇冒口处的缩松缩孔缺陷体积减少了5.2%, 可提高铁型覆砂铸造过程模拟的计算精度。

参考文献:

- [1] 黄列群, 潘东杰. 铁型覆砂铸造工艺及其应用 [J]. 铸造, 1999 (2): 40-42.
- [2] 潘东杰, 何芝梅, 夏小江, 等. 铁型覆砂铸造工艺在汽车轮边减速器壳体生产上的应用 [J]. 铸造, 2014, 63 (2): 162-165.
- [3] 梁作俭, 赵海东, 柳百成, 等. 铁型覆砂球墨铸铁件凝固模拟及收缩缺陷预测 [J]. 特种铸造及有色合金, 2001 (5): 25-27.
- [4] 黄列群, 潘东杰, 何芝梅, 等. 铁型覆砂铸造及其发展 [J]. 现代铸铁, 2006 (3): 12-20.

- [5] 潘东杰, 朱国, 夏小江, 等. 铁型覆砂铸造电梯球铁制动轮的生产应用 [J]. 铸造技术, 2019, 40 (9): 961-964.
- [6] 隋大山, 崔振山. ZL102凝固过程瞬态温度场的模拟与验证 [J]. 铸造, 2008 (7): 674-677.
- [7] MENEGHINI A, TOMESANI L. Chill material and size effects on HTC evolution in sand casting of aluminum alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162 (none): 534-539.
- [8] 林方夫, 黄列群, 潘东杰, 等. 有限元凝固分析及其在铁型覆砂铸造转向器壳体中的应用 [J]. 铸造, 1998 (12): 31-33, 35.
- [9] ZHANG A, LIANG S, GUO Z, et al. Determination of the interfacial heat transfer coefficient at the metal-sand mold interface in low pressure sand casting [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 88: 472-482.
- [10] 黄列群, 董凌云, 潘东杰, 等. 铁型及覆砂层厚度对铸件凝固的影响 [J]. 机电工程, 2012 (2): 163-166.
- [11] 夏小江. 铁型覆砂铸造球墨铸铁件缩松缩孔的防止 [J]. 铸造, 2020, 69 (2): 187-190.
- [12] OKA Y, OHNO M. Parameter estimation for heat transfer analysis during casting processes based on ensemble Kalman filter [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 149: 119-232.
- [13] CHEN L, WANG Y, PENG L, et al. Study on the interfacial heat transfer coefficient between AZ91D magnesium alloy and silica sand-ScienceDirect [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2014, 54 (4): 196-203.
- [14] VACCA S, MARTORANO M, HERINGER R, et al. Determination of the heat transfer coefficient at the metal-mold interface during centrifugal casting [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46 (5): 2238-2248.
- [15] WOLFF N, ZIMMERMANN G, VROOMEN U, et al. A statistical evaluation of the influence of different material and process parameters on the heat transfer coefficient in gravity die casting [J]. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2020, 10 (10): 355-367.
- [16] GUGLIELMI, PASQUALE, TRICARICO, et al. Determination of interfacial heat transfer coefficients in a sand mould casting process using an optimised inverse analysis [J]. Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics, 2015, 78: 682-694.

Numerical Simulation of Temperature Field and Precision Improvement in Sand-Lined Metal Mold Casting Process of Traction Wheel

HU Xue-shuai¹, WANG Dong-hong², WU Wen-yun¹, ZHU Guo³, XIA Xiao-jiang³, QIU Zhong-hua⁴, HUANG Lie-qun³, SHU Da²

(1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai Key Lab of Advanced High-Temperature Materials and Precision Forming, Shanghai 200240, China; 3. Zhejiang Institute of Mechanical&Electrical Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310051, Zhejiang, China; 4. Huzhou Dingsheng Machinery Manufacturing Co., Ltd., Huzhou 313000, Zhejiang, China)

Abstract:

In the process of sand-lined iron mold casting, the process parameters are difficult to control and the heat transfer is complex. In order to improve the accuracy of numerical simulation calculation of temperature field, a numerical simulation pretreatment method of "accurate model-accurate process parameters" is proposed-according to the unique model thickening process design, accurate geometric modeling of iron mold, sand coated layer, castings, gating system and so on is carried out, and the thermal physical parameters of materials are calculated using ProCAST database. The interface heat transfer coefficient of the temperature function is obtained by using the inverse calculation module of ProCAST, and the parameters varying with temperature are used as boundary conditions to replace the constant boundary conditions. In this paper, taking a certain type of traction wheel as an example, aiming at the subtle defects that still exist after optimizing the pouring system, using the above precise pretreatment method, the internal shrinkage defects, shrinkage cavity defects and isolated liquid phase area of the casting disappear, and the volume of shrinkage cavity at the riser is reduced by 5.2%. The simulation accuracy is improved after the actual production verification.

Key words:

sand-lined iron mold; temperature field simulation; process optimization; interface heat transfer coefficient; inverse optimization