

高压蒸汽室铸钢件砂型铸造工艺模拟研究

蔡佳骏, 张亮, 夏双喜, 程方亮, 刘浩, 刘富初

中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院 湖北武汉 430074

摘要: 基于高压蒸汽室铸钢件的结构特点和铸造工艺要求, 设计了该铸钢件的砂型铸造初步方案, 并采用ProCAST软件进行了充型和凝固收缩数值模拟研究。结果表明: 充型过程平稳, 未出现浇不足现象, 但在蒸汽室底座厚大部位、蒸汽室顶部凸台处出现了大体积缩孔, 同时铸件中产生了分散的缩松缺陷。结合模拟结果, 对缺陷部位增加了冒口和冷铁, 改进后的模拟结果良好, 没有缩孔缺陷。

关键词: 高压蒸汽室铸件; ZG15Cr2Mo1; 砂型铸造; 工艺模拟; ProCAST

Numerical simulation of sand casting process for high-pressure steam chamber steel castings

CAI Jiajun, ZHANG Liang, XIA Shuangxi, CHENG Fangliang, LIU Hao, LIU Fuchu

School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

Abstract: Based on the structural characteristics and casting requirements of high-pressure steam chamber steel castings, a preliminary scheme of sand casting process for steel castings was designed, and the simulation of filling and solidification shrinkage was carried out by using ProCAST software. The simulated result show that filling is stable and no insufficient pouring occurred. However, large volume shrinkage holes are appeared in the bottom thick part and top boss of the steam chamber, and dispersed shrinkage defects are produced in the castings. Based on the simulation results, the riser and cold iron are added to the defect part, and its simulation results show that the optimized designed casting process is good without shrinkage hole defects.

Keywords: high-pressure steam chamber castings; ZG15Cr2Mo1; sand casting; process simulation; ProCAST

1 序言

汽轮机也称蒸汽透平发动机, 是一种旋转式蒸汽动力装置, 高压蒸汽室是汽轮机的组成部分、材质为ZG15Cr2Mo1。蒸汽室即蒸汽通过主汽阀后进

入调节汽阀前, 为均衡汽流而设置的腔室; 在蒸汽室的圆形空腔内可安装转子, 蒸汽由蒸汽室的进气口进入, 从蒸汽室的出气口流出, 从而吹动转子转动^[1]。高压蒸汽室服役温度高(约为565℃), 泵水

基金项目: 教育部产学研合作协同育人项目2022年第一批立项项目(No. 220604555150617); 国家级大学生创新创业训练计划项目(No.202310491008、No.202310491028、No.202310491045、No.202310491065、No.S202310491121和No.S202310491010); 中国地质大学(武汉)教学实验室开放基金项目(No. SKJ2023125); 广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金面上项目(No. 2024A151013258); 中央引导地方科技发展资金自由探索类基础研究项目(No. 2021Szvup158、No. 2021Szvup159); 材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题自然科学基金(No. P2021-020); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. CUG2106346)。

第一作者: 蔡佳骏, 本科生, 主要研究方向为精密铸造等, E-mail: 2082841322@qq.com。

通信作者: 刘富初, 工学博士/博士后, 副教授, 主要研究方向为陶瓷型芯增材制造和精密铸造等, E-mail: liufuchu@cug.edu.cn。

压力为8.28MPa，约为82个大气压，需要保持10min不漏水；在此服役条件下，蒸汽室要保持长时间不停歇运转，还要满足20年的使用寿命要求。因此，高压蒸汽室长期处于高温、高压工作环境，对铸件本体质量要求极高^[2]，多采用铸钢件。

在传统铸造业中，铸件生产一般采用先试制、后分析的步骤，通过反复调整改进铸造方案，才能最终得到正确的工艺，这样不但浪费人力物力，还会增加生产周期^[3-5]。采用铸造仿真模拟软件进行铸件铸造工艺模拟优化研究，可减少研发周期和人力成本，目前已有多种复杂铸件（铸钢、铸铁和铸铝等）采用模拟仿真技术进行铸造工艺改进与优化^[3-9]。本文采用ProCAST铸造模拟软件对高压蒸汽室铸钢件砂型铸造工艺进行模拟研究，获得较优的铸造工艺方案，该选题是2023 中国大学生机械工程创新创业大赛：第十四届铸造工艺设计赛B件，来源于企业选供给大赛组委会，是企业亟需突破的铸钢件铸造难题。张亮等^[10]采用ProCAST软件对ZG15Cr2Mo1高压蒸汽耐热铸件进行正交试验数值模拟研究，分析了浇注温度、浇注速度和内浇道数量对缩松、缩孔缺陷的影响。本文基于前期模拟研究结果，结合铸造工艺理论分析与浇冒口设计要求，进行高压蒸汽室铸钢件砂型铸造工艺模拟研

究。因此，本文研究具有重要的研究意义与实际应用价值。

2 铸件特点与要求

以高压蒸汽室铸件为研究对象，其材质为合金铸钢ZG15Cr2Mo1，密度为7.8g/cm³。蒸汽室材质ZG15Cr2Mo1的化学成分见表1。

表1 ZG15Cr2Mo1化学成分（质量分数）（%）

C ^①	Mn	Si	Cr	Mo	S	P
≤0.18	0.40~0.70	≤0.60	2.00~2.75	0.90~1.20	≤0.030	≤0.030

① 对于上限 w_C 每减少0.01%， w_{Mn} 允许增加0.04%，但 w_{Mn} 最高为1.2%。

基于铸件化学成分可知液相线为1501℃，铸件受阻线收缩率为1.8%，需要设计冒口进行补缩处理，从而保证铸件综合性能。

图1所示为在设定加工余量后的铸件结构。铸件轮廓尺寸为1648mm×620mm×1077mm，体积为0.251m³，铸件质量为1957.8kg。最大壁厚为153mm，最小壁厚为30mm。

每一种铸造合金的铸件，都有其合适的壁厚范围，如果适当，既可保证铸件的力学性能要求，又可方便铸造生产，同时还可节约金属材料，减轻铸

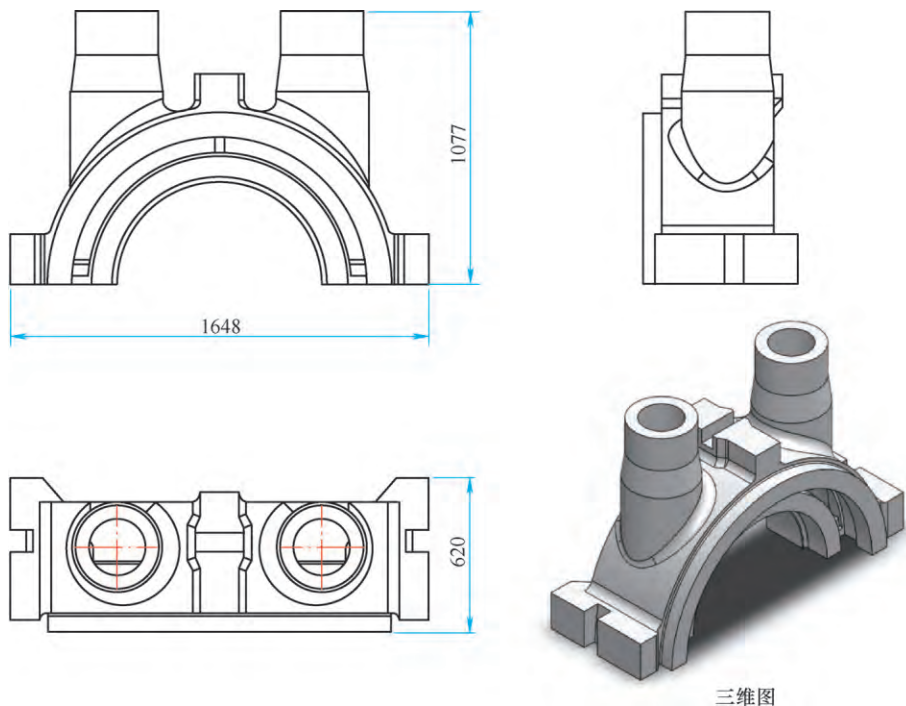


图1 铸件结构

件质量。基于高压蒸汽室铸钢件的尺寸特点，由铸造手册中砂型铸造铸钢件的最小壁厚列表可知，其最小壁厚为20mm^[11]。

图2所示为对蒸汽室铸件的壁厚分析结果。分析可知，本铸件满足最小壁厚和临界壁厚要求。

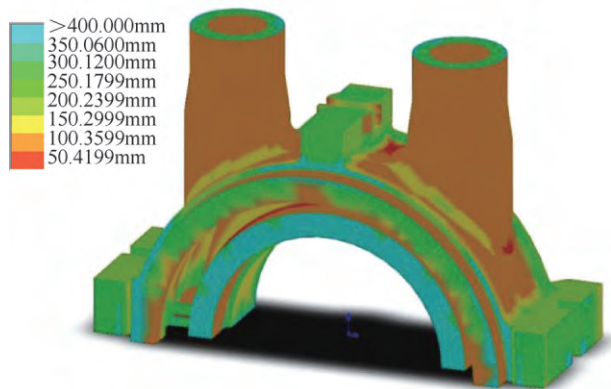


图2 铸件的壁厚分析结果

3 铸件工艺方案分析

铸造工艺方案设计包括造型（芯）材料、铸件浇注位置、分型面、砂芯及工艺参数的确定等。

3.1 浇注位置和分型面的确定

铸件的浇注位置是指浇注时铸件在铸型中所处的位置。铸造分型面是指为便于取出模样，将铸型做成几部分，铸型组元间的接合面。分型面的选择应尽量与浇注位置一致，尽量使两者协调起来，使铸造工艺简便，并易于得到高质量的铸件。合理选择浇注位置和分型面，可以直接简化铸造工艺、提高生产率、降低成本、提高铸件质量。

本文研究铸件高压蒸汽室比较合理的浇注位置和分型面有立式和卧式两种。图3a所示为立式浇注位置，图3b所示为卧式浇注位置。

从铸件形状结构和尺寸来看，如果铸件呈立式

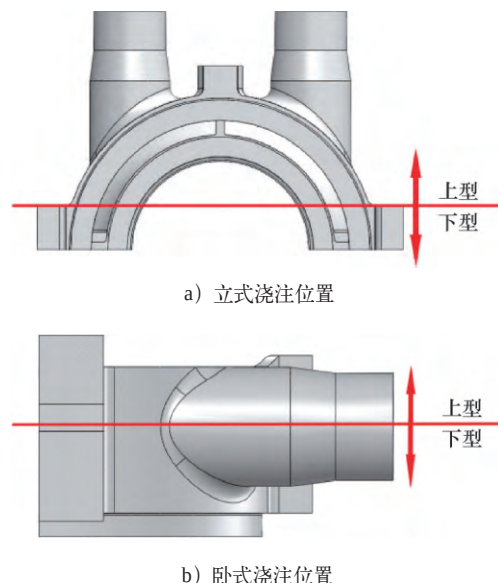


图3 蒸汽室合理浇注位置和分型面

位置进行浇注，砂箱的高度会过高，充型时金属液会对型腔产生很大冲击力，充型不平稳，同时，选取分型面在蒸汽室底座上表面，满足分型面取在最大截面处的原则，但合型容易错位。当浇注时铸件采取卧式位置时，可以取最大截面为分型面，方便起模；在设计补缩工艺时，铸件厚实位置在上方，方便安置冒口进行补缩；此外，卧式浇注位置还可以避免芯撑的使用，简化了工艺设计。综上所述，采取工艺设计采取卧式浇注位置和分型面。

3.2 铸型的设计

蒸汽室铸钢件的浇注温度较高（约1580℃），钢液对砂型的热冲击强^[12]，对砂型和砂芯的耐火度要求高，选取的原砂中SiO₂含量应≥97%^[13]，采用酚醛树脂砂造型和制芯，选用刚玉粉醇基涂料，采用操作方便、生产效率高、快速且有效的喷涂法。

图4所示为铸件铸造时砂芯的摆放位置。根据该铸件的内腔结构来确定需要的砂芯，拟设计本铸件

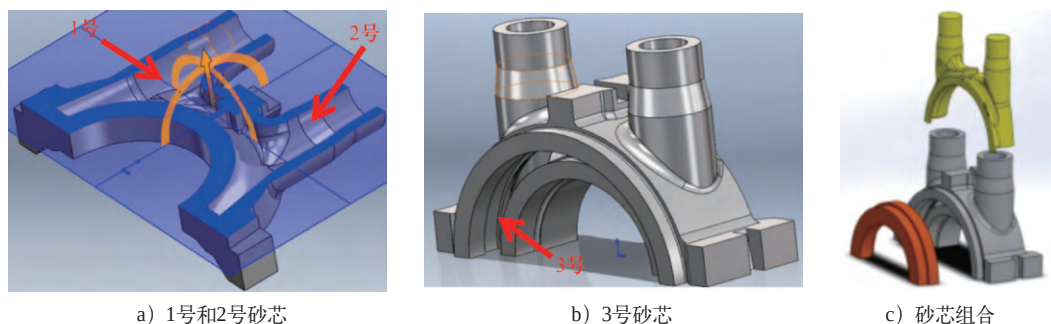


图4 铸件铸造时砂芯的摆放位置

需要3个砂芯。将蒸汽室内腔左右两部分分成2个砂芯，拟用1号和2号砂芯用于铸造蒸汽室内腔，对于外壳孔，为了保证一次铸出，故设计了3号砂芯。

3.3 铸造工艺参数

本铸钢件属于小批量生产，采用树脂自硬砂手工造型，尺寸公差等级选用 CT13 (GB/T 6414—2017《铸件 尺寸公差、几何公差与机械加工余量》)，重量公差等级为 MT12 (GB/T 11351—2017《铸件重量公差》)，重量公差数值为8%。为获得尺寸精度较高的铸件，受阻线收缩率为1.8%。

4 基于理论计算的铸造工艺设计

铸钢件浇注温度高，在浇注过程中钢液对型腔产生大量辐射热量，型腔被高温加热后会发生体积膨胀，造成型砂溃散。在中大型铸件生产过程中，浇注钢液量大，若不能实现快速浇注，钢液的热辐射作用将对砂型产生严重危害。

铸钢件的浇注系统一般都采用开放式、用底注包浇注。本铸件属于中等结构的中大型铸件，考虑到铸件有承压技术要求，钢液上升速度按复杂件的数值增加30%~50%，取为 $v_L = 35\text{mm/s}$ 。

按式(1)计算浇注时间，即

$$t = \frac{G_L}{Nnv_{\text{包}}} \quad (1)$$

式中 t ——浇注时间 (s)；

G_L ——型腔内钢液总重量 (包括胀箱、浇冒口重量) (kg)；

N ——同时浇注的浇包数量 (个)；

n ——每个浇包的包孔数 (个)；

$v_{\text{包}}$ ——钢液的浇注速度 (kg/s)。

铸件胀箱重量增加率取7%，计算钢液重量 $G_L = (1 + 7\%) G_C = 2094.846\text{kg}$ 。

取 $N = 1$ 个、 $n = 1$ 个。包孔直径选取70mm，则 $v_{\text{包}} = 120\text{kg/s}$ 。理论计算的浇注时间 $t = 17.46\text{s}$ ，结合铸造生产实际，可将浇注时间定为18s。

由 $v_L = \frac{h_c}{t}$ 得到式(2)，按式(2)进行验算，即

$$v_L = \frac{h_c N n v_{\text{包}}}{G_L} \quad (2)$$

式中 v_L ——金属液面上升速度 (mm/s)；

h_c ——铸件在浇注位置时的高度 (mm)。

铸件在此浇注位置的高度 $h_c = 620\text{mm}$ ，此时按

式(2)计算液面上升速度 $v_L = 35.5\text{mm/s} > 35\text{mm/s}$ 。

采用开放式浇注系统，各单元截面积的比例关系可采用 $\Sigma A_{\text{包}} : \Sigma A_{\text{直}} : \Sigma A_{\text{横}} : \Sigma A_{\text{内}} = 1.0 : (1.8 \sim 2.0) : (1.8 \sim 2.0) : (2.0 \sim 2.5)$ [14]。因包孔直径为70mm ($> \phi 55\text{mm}$)，所以采用耐火砖管浇注系统。

金属液流程较远，需要用压力核算 h_M 是否足够，其计算式为

$$h_M = L \tan \alpha \quad (3)$$

式中 h_M ——最小剩余压头 (mm)；

L ——金属液的流程，即铸件最高、最远点至直浇道中心线水平距离 (mm)；

α ——压力角 ($^\circ$)。

当直浇道长度为250mm， $h_M = 83\text{mm}$ ， $L = 790\text{mm}$ ，根据 L 值以及铸件壁厚取 $\alpha = 6^\circ$ ，满足 $h_M \geq L \tan \alpha$ ，故本设计方案的最小剩余压头符合要求。

图5所示为初步设计的浇注系统。基于蒸汽室零件圆形空腔的结构特点，铸件浇注系统设置3个均匀分散分布的内浇道位于分型面处，尽可能使水平方向的温度分布均匀。

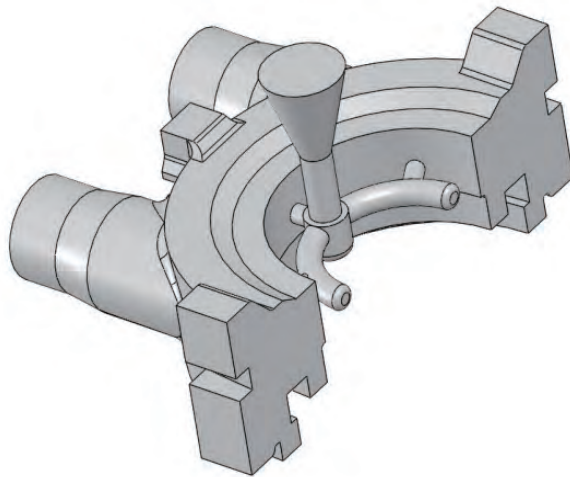


图5 浇注系统分布

5 ProCAST数值模拟及改进

5.1 模拟初始参数确定

按照上述初步设计的工艺方案，用ProCAST数值模拟软件对高压蒸汽室铸件进行充型及凝固过程数值模拟。已知液相线温度为1501℃，浇注温度在模拟中近似取为1600℃。图6所示为铸造工艺方案系统模型网格划分。浇注时间为18s，金属与砂型之间的换热系数 $h = 750\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

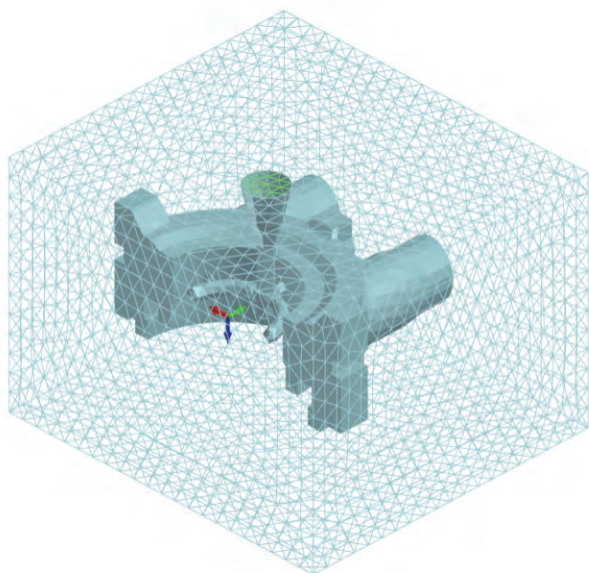


图6 铸造工艺方案网格剖分

5.2 模拟结果分析

图7所示为金属液充型过程数值模拟结果。在充型过程中，铸件没有出现浇不足情况，采用上述设计的铸造工艺方案可以实现完整充型。

图8所示为铸造工艺模拟结果缺陷预测。由图8可知，在蒸汽室底座厚大部位存在非常大的缩孔缺陷，在蒸汽室隔板和铸件顶部凸台壁的过渡连接

处也存在明显的缩松缩孔现象。铸件较厚处出现缩松、缩孔的原因在于蒸汽室底座和顶部凸台壁厚过厚，存在热节^[14]；且处于本浇注位置较高水平面，散热过慢，存在孤立液相区，这些部位往往会形成缺陷^[15-17]，影响铸件品质。

5.3 工艺方案改进

上述模拟结果表明，缩松、缩孔主要集中在蒸汽室底座两侧的厚大部位处和蒸汽室2个进气口的隔板处与顶部凸台。因此，冒口优先设置在图9所示的4个位置，对铸件进行补缩改进。通过模数法计算该4个位置的冒口模数，根据铸造手册即可查得各个冒口的尺寸。

在设置冒口的基础上，在缩松缺陷明显处安放冷铁进行工艺改进。图10所示为冷铁安放位置。在蒸汽室底座厚大位置内侧空腔处与2个蒸汽口隔板处分别设置冷铁，遵循顺序凝固原则，希望设置冷铁部位先于冒口凝固，将大部分凝固缺陷集中在冒口中。

改进后的工艺方案经过三维建模后，利用ProCAST数值模拟软件进行了数值模拟计算，模拟结果如图11所示。

从图11可看出，铸件的缩孔情况得到了显著

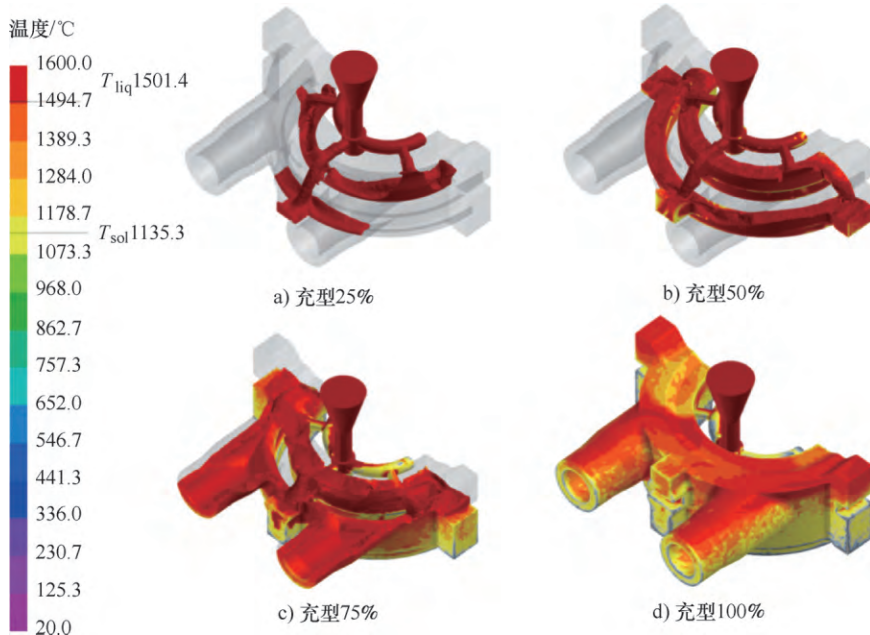


图7 金属液充型过程

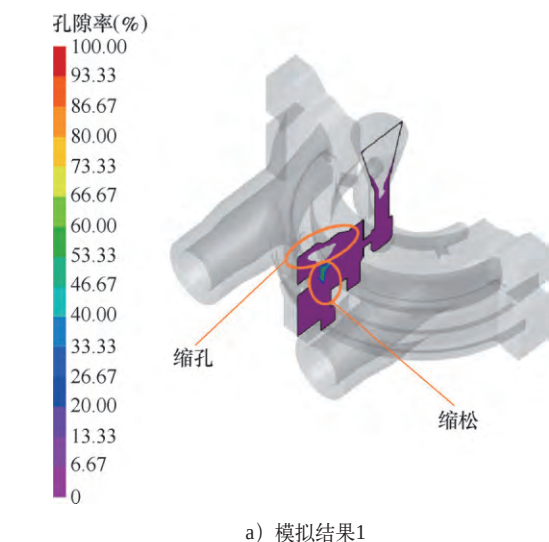
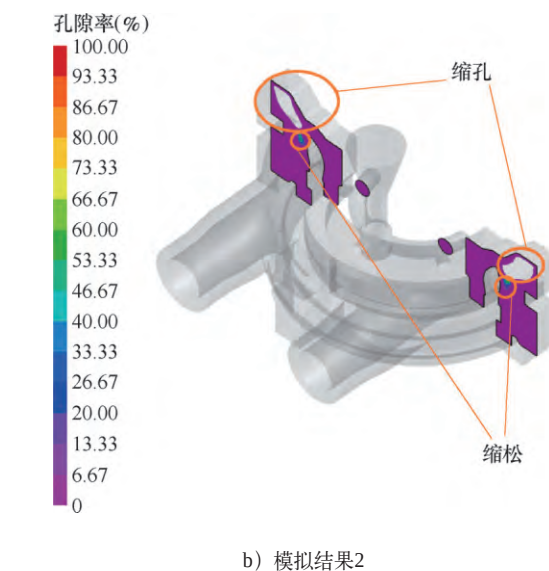
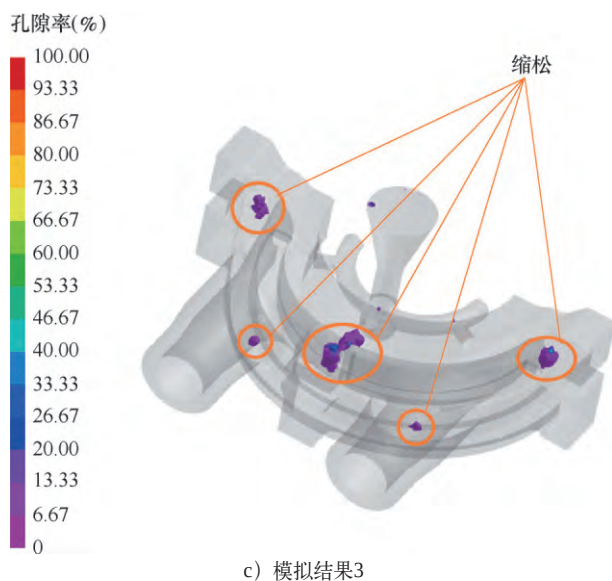


图8 铸造工艺模拟结果缺陷预测

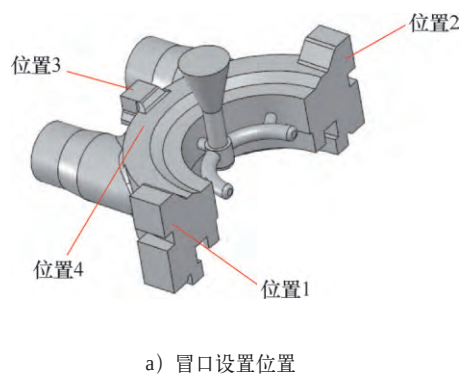
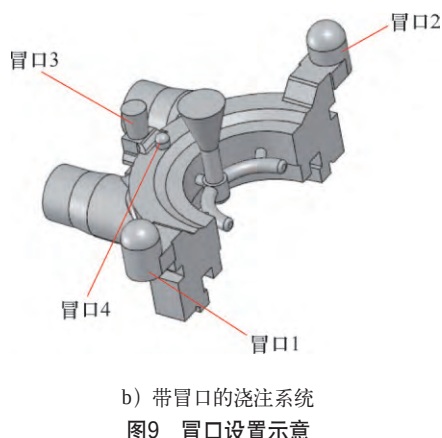
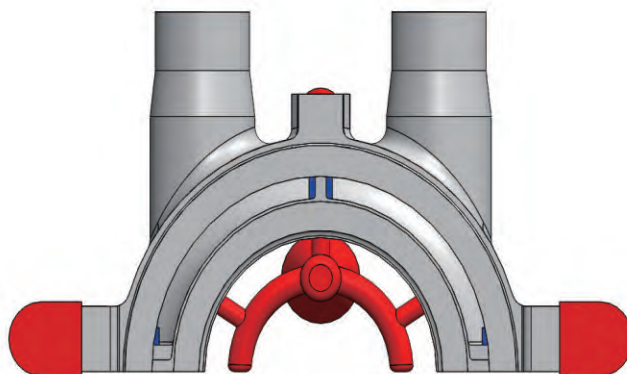
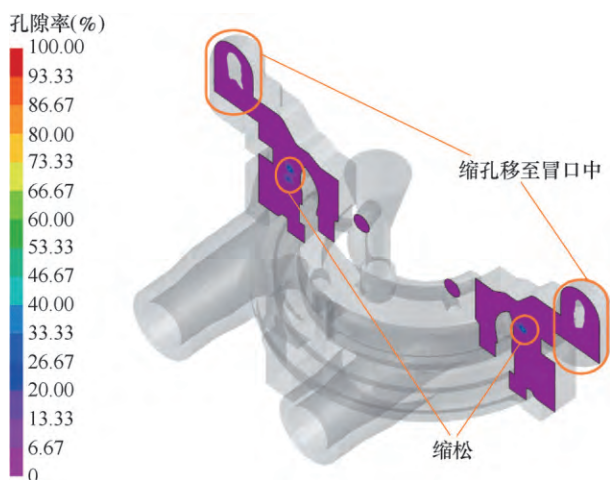


图9 冒口设置示意

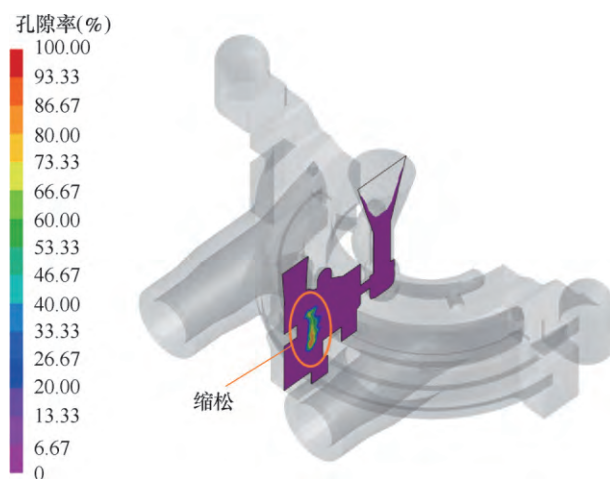


改善, 缩孔转移到了冒口中, 铸件不存在明显的缩孔, 总收缩孔隙率为2.71%。但由于安放了冷铁, 蒸汽室隔板处的金属液先于周围凝固, 凸台处金属液流向隔板处, 对隔板进行了补缩, 导致凸台处缩松由上而下延伸, 比设置冷铁前的深度更大。

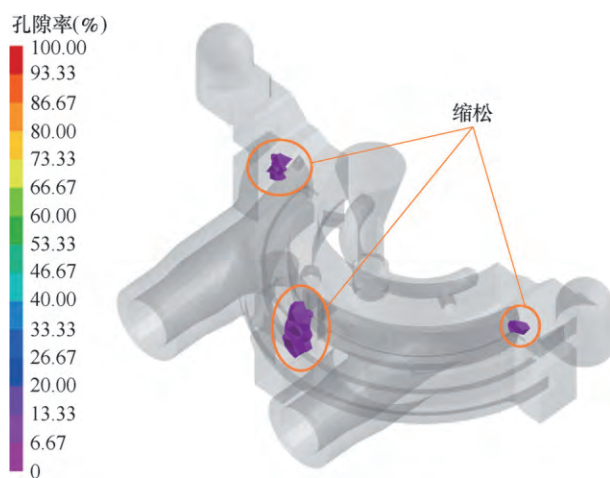
在后续的改进过程中, 还可采用改变冒口尺寸和数量及其位置, 改变冷铁的尺寸, 以及设计保温冒口等措施来消除缩松缺陷, 保证蒸汽室顶部凸台部位不会因凝固缺陷而塌陷^[17], 从而提高铸件成品率。



a) 模拟结果1



b) 模拟结果2



c) 模拟结果3

图11 改进的铸造工艺模拟结果缺陷预测

6 结束语

1) 根据高压蒸汽室材质和结构特点进行了铸造工艺方案分析。通过理论计算设计了高压蒸汽室铸

钢件的初步铸造工艺方案,利用ProCAST铸造模拟软件对原铸造工艺方案进行充型凝固过程模拟,设置浇注温度为1600℃,浇注时间为18s,金属与砂型之间的换热系数 $h=750\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,基于铸件缺陷类型和产生的位置对原工艺方案进行改进设计。

2) 在蒸汽室顶部凸台和底座两侧厚大部位处设计冒口,在蒸汽口隔板两侧和蒸汽室内腔最靠近底座缺陷处安放外冷铁,对改进后的工艺进行再次数值模拟。模拟结果表明,改进后的工艺方案消除了缩孔缺陷,总收缩孔隙率为2.71%,为进一步完全消除缩松缺陷提供了工艺设计思路。

参考文献:

- [1] 蔡振铭. 汽轮机蒸汽室加工工艺: CN201010241804. 2[P]. 2010-12-29.
- [2] 李杰, 周催佰, 易连强. 基于MAGMA软件的汽轮机蒸汽室铸造工艺设计[J]. 铸造工程, 2023, 47 (1): 67-72.
- [3] 刘瑞杰, 王成军, 刘志魏. 基于ProCAST轴座砂型铸造数值模拟研究[J]. 铸造技术, 2016, 37 (1): 87-90.
- [4] 赵红乐, 范文学, 寇海军, 等. 铸钢砧座铸造工艺设计及优化[J]. 铸造, 2023, 72 (10): 1357-1362.
- [5] 周琴, 王瞳, 沈旭, 等. 基于时间梯度法的铸钢件三维补缩路径计算[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (2): 158-161.
- [6] 杨建, 曹峤, 宋帮, 等. 汽轮机高压内缸铸造工艺优化设计和关键工艺控制[J]. 铸造, 2023, 72 (10): 1345-1349.
- [7] 尹管彬, 杨刚, 杨屹, 等. 基于ProCAST的某直列式发动机缸体铸造数值模拟分析[J]. 热加工工艺, 2022, 51 (11): 66-69, 72.
- [8] 周立华, 骆静, 唐克岩, 等. 基于ProCAST的制动器隔离盘低压铸造模拟分析[J]. 热加工工艺, 2020, 49 (7): 68-70.
- [9] 罗怀晓. 铸钢框架铸造工艺模拟研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45 (21): 85-86, 90.
- [10] 张亮, 蔡佳骏, 夏双喜, 等. 基于正交试验的高压蒸汽室铸钢件铸造工艺模拟优化研究[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (9): 109-114.
- [11] 中国机械工程学会铸造分会组编. 铸造手册 (第5卷): 铸造工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.

(下转第121页)

0.121mm。综上所述,当温度在800~1050℃之间时,轧制温度的变化对轧件直线度有着显著影响,但影响不是单调的,800℃、900℃和1000℃下的直线度相对较好,表明可能存在一个或多个温度范围,在这些范围内材料的性能和轧制过程的条件能够达到最佳平衡,从而获得较好的直线度。

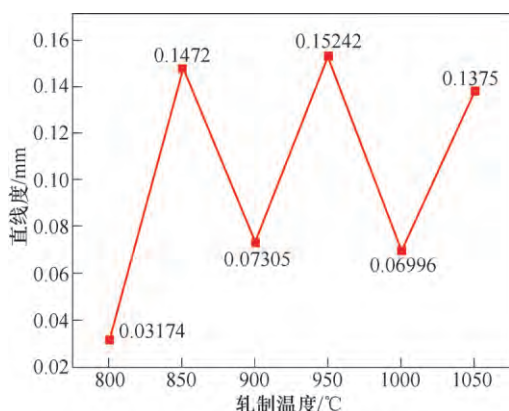


图9 轧件直线度随轧制温度变化曲线

4 结束语

本文基于ABAQUS仿真软件对GCr15直线滚动导轨热轧过程进行三维建模,通过设置不同的轧制温度,对轧制过后轧件轴向中心区域横截面轧制方向残余应力,以及轧件轧制方向直线度进行分析,探究了轧制温度对轧件残余应力和直线度的影响规律,得到了如下结论。

1) 轧件横截面的轧制方向残余应力呈现出典型的“M形残余应力分布”,轧件中心区域残余应力表现为压应力,且中心位置应力值最大,逐渐向外减小,然后过渡为拉应力,一直持续到轧件表层下方区域,最后又过渡为压应力。

2) 在800~1050℃下,随着轧制温度的升高,轧件横截面轧制方向残余应力最大值与最小值差值呈现下降趋势,轧件横截面残余应力分布均匀性得

到增强;除轧辊顶角下方对应轧件区域残余应力随着轧制温度的上升而增大以外,轧件横截面残余应力均随着轧制温度的上升而下降,这是由于轧制温度的上升使得轧件的金属流动性得到增强,轧件上下两侧金属变形量得到增大,其余部分阻碍金属变形的抵抗力下降,因此残余应力下降。

3) 在800~1050℃下,轧件200~800mm内轴向直线度受到轧制温度的显著影响,但影响不是单调的,而是在不同温度下表现出复杂的波动。800℃、900℃和1000℃下的直线度相对较好,表明可能存在一个或多个温度范围,在这些范围内材料的性能和轧制过程的条件能够达到最佳平衡,从而获得较好的直线度。

参考文献:

- [1] 凌明成. 终轧温度对GCr15轴承钢组织与硬度的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51 (19): 76-78.
- [2] 余万华, 石素锦, 刘玉坤, 等. 轧制温度对GCr15轴承钢组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41 (1): 80-85.
- [3] 陈浩, 丁文红, 方玉, 等. NM400钢终轧温度对其相变行为及残余应力的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48 (9): 14-22.
- [4] 张方圆. 硬切削GCr15轴承钢表面变质层微观组织及抗磨损性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [5] 温飞娟, 谭春梅, 温奇飞, 等. 增材制造金属结构件残余应力的研究进展[J]. 中国材料进展, 2024, 43 (1): 66-78.
- [6] 胡伟. 滚动直线导轨冷拔工艺研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- [7] 王卫卫, 胡霄雨, 肖金福, 等. 热轧板带钢轧制残余应力的研究: “第十四届中国钢铁年会”论文集[C]. 北京: 中国金属学会, 2023.

MW 20240315

(上接第115页)

- [12] 杨清, 李爽, 王旭, 等. 大型框架铸钢导轨铸造工艺设计与优化[J]. 铸造, 2022, 71 (9): 1163-1168.
- [13] 申恩强. 铁路铸钢件湿性粘土砂铸造工艺优化及缺陷防治[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [14] 王文清, 李魁盛. 铸造工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

- [15] 申恩强, 樊自田, 龙威, 等. 车钩钩舌的铸造工艺模拟与优化[J]. 铸造, 2011, 60 (8): 765-768.
- [16] 邵雄. 基于CAE分析的铸钢件冒口优化技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [17] 李永刚, 王焕宁, 宋学恩, 等. 一种发动机飞轮壳塌陷缺陷分析及改进[J]. 铸造设备与工艺, 2022 (6): 44-45, 57.

MW 20240125