

# 高铁挂架熔模铸造工艺优化

刘继广<sup>1, 2</sup>, 王殿飞<sup>1, 2</sup>, 方晓刚<sup>1, 2</sup>, 吴天宇<sup>1, 2</sup>, 张雅咪<sup>1, 2</sup>, 杨友文<sup>1, 2</sup>

(1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 安徽合肥 230000; 2. 高性能铜合金材料及成形加工教育部工程研究中心, 安徽合肥 230000)

**摘要:** 高铁挂架作为轨道交通自动门驱动关键零部件, 其内部质量和力学性能有较高的要求。针对传统焊接工艺生产的挂架所存在的条渣、裂纹等缺陷, 作者提出以铸代焊的工艺方法, 根据挂架结构特点设计挂架熔模铸造工艺方案, 并利用有限元模拟软件分析挂架充型凝固过程, 预测缺陷位置, 通过实际生产对比缺陷位置以验证工艺方案可靠性。为进一步减少缩孔缩松等缺陷, 随后采用正交试验获得最优工艺参数, 并分别设计圆台形、球形冒口进行补缩, 使铸件缺陷由 $7.26 \text{ cm}^3$ 降至 $0.15 \text{ cm}^3$ 。结果表明, 优化方案可得到高质量的挂架铸件, 其工艺设计思路也可为类似结构的精铸件生产提供参考。

**关键词:** 高铁挂架; 熔模铸造; 数值模拟; 工艺优化

## 作者简介:

刘继广(1963-), 男, 教授, 研究方向为材料成形技术和装备研发。E-mail: jiguangliu@163.com

## 通讯作者:

方晓刚, 男, 讲师, 博士。E-mail: fangxg@hfut.edu.cn

中图分类号: TG249.5

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2021)08-0968-08

## 基金项目:

安徽省科技重大专项(17030901050); 安徽省自然科学基金(1908085QE197); 中央高校基本科研业务费专项资金(JZ2019HGTA0043)。

## 收稿日期:

2021-02-22 收到初稿,

2021-03-22 收到修订稿。

高铁挂架应用于轨道交通自动门承载系统, 主要起到固定悬挂的作用。作为一种连接件, 高铁挂架要承受各向作用力, 载荷较大且受力情况复杂, 是轨道交通自动门开合系统中重要的受力部分, 因此对于挂架铸件的整体性能有了更高的要求。目前国内企业多采用传统焊接工艺生产系列产品, 易造成产品焊点各处的力学性能不一致、产品后期加工定位不准确等问题, 从而影响产品使用性能以及增加产品生产加工成本。针对这类问题, 本研究提出用熔模铸造工艺代替焊接工艺, 通过一次铸造成形, 提升挂架力学性能和内部质量, 保障轨道交通自动门系统安全性。

熔模铸造技术是一种适用于生产轨道交通零部件的近净成形工艺方法, 通过使用易熔材料蜡模做成精确的型壳, 在熔模上涂挂耐火材料经涂料、撒砂制得, 经过干燥硬化脱模后制成型壳, 焙烧后获得高精度、高强度型壳进行浇注, 而挂架属于小型铸件, 型壳制作方便, 适用于熔模铸造方法<sup>[1-2]</sup>。由于该工艺方法获得的铸件性能优异、尺寸精度高、表面光洁度高, 无需或少加工, 在铸造领域引起广泛研究。蔡虎<sup>[3]</sup>等通过设计多种熔模铸造浇注系统方案对支架铸钢件进行充型凝固模拟分析, 对比缺陷大小选择最优浇注系统并补缩优化, 保证了铸件的质量和工艺性。吴冰<sup>[4]</sup>等针对阀盖在熔模铸造中常出现缺陷, 设计顶注式浇注系统促进阀盖顺序凝固, 有效改善了缺陷分布情况。然而, 熔模铸件由于生产工序繁多、复杂, 如若工艺方案选择不当, 会明显提高废品率和成本。相比于传统试错方法, 可借助有限元模拟确定工艺方案, 不仅为消除铸造缺陷提供有力工具, 还避免了“经验+试验”方法的大量工作, 减少产品开发成本, 缩短开发周期<sup>[5-9]</sup>。

本研究针对高铁挂架的结构特点与使用要求, 设计合适的浇注工艺方案, 通过有限元模拟软件对高铁挂架的充型凝固过程进行分析, 预测成形过程中缺陷可能产生的位置并验证, 分析缺陷产生原因, 设计优化工艺方案<sup>[10-11]</sup>。

## 1 高铁挂架工艺分析

### 1.1 高铁挂架结构分析

高铁挂架的三维模型如图1所示, 挂架整体结构由圆筒壁和腹板组成, 虚线以上

为圆筒壁，以下则为腹板，传统焊接工艺以虚线上下连接为焊接处，并且处于腹板最薄处，会导致性能不佳。挂架外轮廓尺寸长134 mm，高147 mm，圆筒壁直径为57 mm，整个腹板最薄部位为6 mm，最厚部位为18 mm，较厚部位在成形过程中易形成缺陷。铸件总体积约187.82 cm<sup>3</sup>，外表面积约579.45 cm<sup>2</sup>，单个挂架重量为1.7 kg，属于小型铸件。

高铁挂架铸件材质为ZG270-500，从化学成分组成（表1）可以看出，ZG270-500属于典型的中碳钢，该铸钢具有一定的韧性和塑性，强度和硬度较高，力学性能优良。在铸造生产中，流动性较差，易于氧化，凝固收缩率较大，并且经常出现魏氏体组织。对于此类铸钢件，可通过后续热处理工艺来提高铸钢的综合力学性能，同时也可以在前期的铸造生产过程中选择合适浇注温度、浇注速度等工艺参数来避免魏氏体组织的出现<sup>[12-13]</sup>。

## 1.2 初始熔模铸造工艺方案

高铁挂架初始浇注系统方案三维模型如图2所示，一模八件均布，采用横浇道与内浇道组合设计，内浇口设置在腹板厚大部位，利于凝固过程补缩，属于中间顶部注入式浇注系统，其中横浇道的横截面是边长为50 mm的正三角形，总长度为290 mm，内浇道的横截面为40 mm × 20 mm × 25 mm的长方体，浇注系统与铸件整体质量为21.6 kg。将初始浇注系统方案三维图保存为step文件并导入模拟软件前处理模块中进行处理，自动生成型壳，型壳厚度为6 mm，成壳之后对该三维模型进行有限元网格划分，为了保证计算精度，整体网格尺寸取铸件最小尺寸的二分之一为3 mm，总网

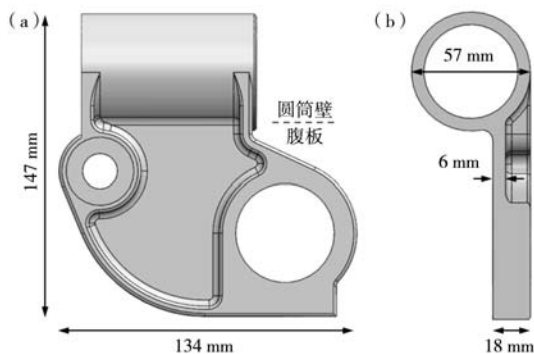


图1 高铁挂架三维模型

Fig. 1 Three dimensional model of high-speed rail pylon

表1 ZG270-500的化学成分  
Table 1 Chemical composition of ZG270-500

C	Si	Mn	S	P	Cr
0.32~0.38	0.2~0.5	0.5~0.9	≤0.035	≤0.035	≤0.35

格数约为210万个，如图3所示。

## 1.3 初始工艺参数的设置

根据实际该成分铸钢件生产经验拟设定工艺参数：浇注温度1 580 ℃，型壳材料采用酚醛树脂砂，型壳温度设置为600 ℃，铸钢件易氧化，浇注速度不宜设置太快，初设为3 kg/s。传热系数设置：型壳与铸件界面传热系数为700 W/(m<sup>2</sup>·K)，型壳外端面和冒口端面的散热方式为空冷，设置为Air Cooling (FilmCo=10, T=20 ℃)<sup>[14]</sup>。通过模拟仿真观察充型与凝固过程，分析缺陷形成原因，验证缺陷位置与真实情况是否相符。

## 2 初始方案数值模拟结果与分析

### 2.1 充型过程分析

根据前文设置的工艺参数对高铁挂架进行数值模拟，图4所示为高铁挂架的充型过程。从模拟结果可知，浇注过程中金属液通过内浇道由铸件中部开始充型，当金属液进入型壳型腔，即图4a、4b充型10%~45%时，流动速度较快，在最先充填的部位产生轻微的涡流，卷入少量的气体，如图5所示在挂架圆筒壁上和圆环下部处存在气体残留，最终产生气孔缺陷<sup>[15]</sup>；当充型为图4c的70%时，靠近直浇道口处的铸件基本充满，其余充型至腹板上处，液面没有明显的波动，充型过程平稳，随后金属液一直呈紊流状态至100%充满型腔。

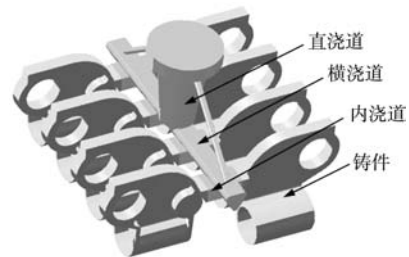


图2 高铁挂架三维模型

Fig. 2 Three dimensional model of high-speed rail pylon

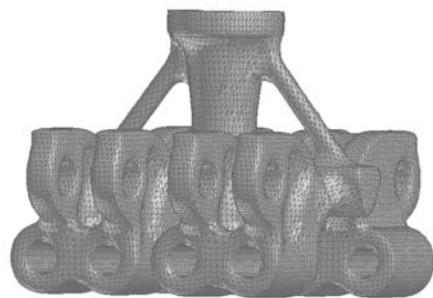


图3 初始浇注系统方案网格划分

Fig. 3 Mesh generation of initial gating system

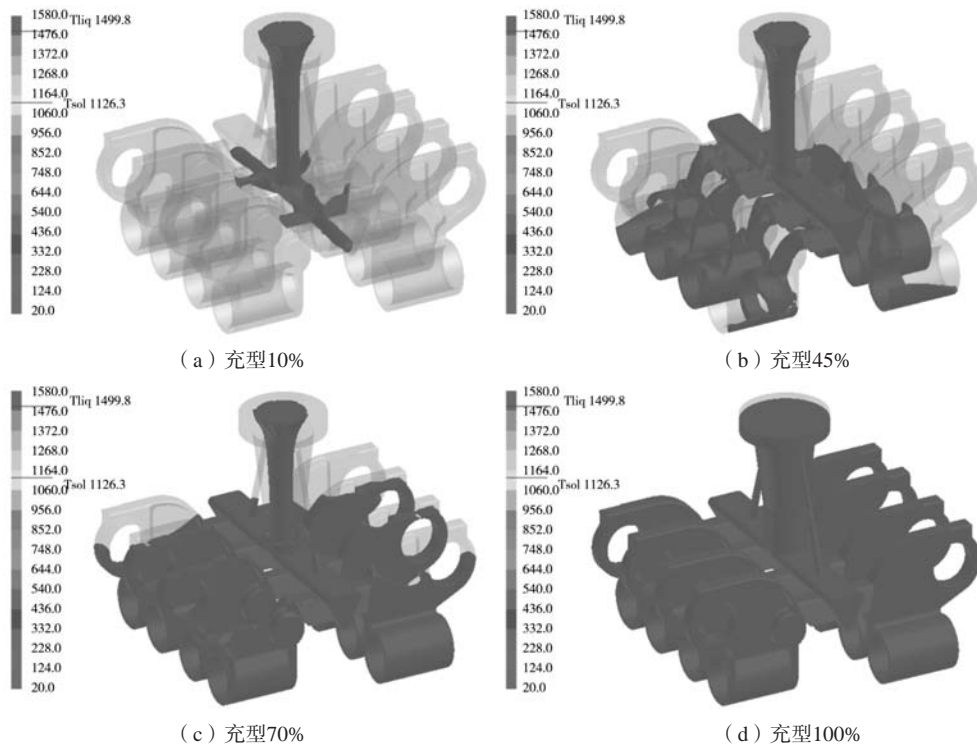


图4 挂架充型过程模拟

Fig. 4 Simulation of pylon filling process



图5 充型过程空气分布模拟

Fig. 5 Simulation of air distribution in mold filling process

## 2.2 凝固过程分析

图6为铸件凝固过程中的二维截面图。深灰色部位表示未凝固区域，固相率为0，灰色区域表示完全凝固区，固相率为100%。从图6a和图6b可以看出，随着温度的降低，凝固的前、中期金属液整体按从下到上，从远离浇口的部位到靠近浇口部位进行顺序凝固，铸件下端的圆筒壁区域为最先凝固部位，其补缩较好，无明显缺陷产生。从图6c可以看出，当铸件腹板上端和圆孔下部的拐角位置还未完全凝固时，这两个位置周围的其他部位已完全凝固，这是因为该处厚度较厚且处于边缘狭窄部位，由于无法得到有效的补缩会形成孤立熔池，最终成为缩孔、缩松缺陷。

## 2.3 缩松缩孔预测

图7为有限元模拟软件预测铸件出现缩松缩孔缺陷的位置，总体积为7.26 cm<sup>3</sup>。缩松缩孔主要分布在铸件腹板最后凝固区域，这是由于厚壁处的孤立液相在随后凝固时形成的体积收缩无法得到填充而导致的，这与凝固过程模拟结果十分吻合。图8为采用初始工艺实际浇注的高铁挂架铸件，发现模拟结果与高铁挂架浇注过程中实际产生的缺陷大小和位置基本一致。在此基础上结合理论分析了缺陷产生原因，证明了此次模拟中软件所设置参数合理，为后续进行工艺方案的优化设计提供了准确的边界条件<sup>[6]</sup>。

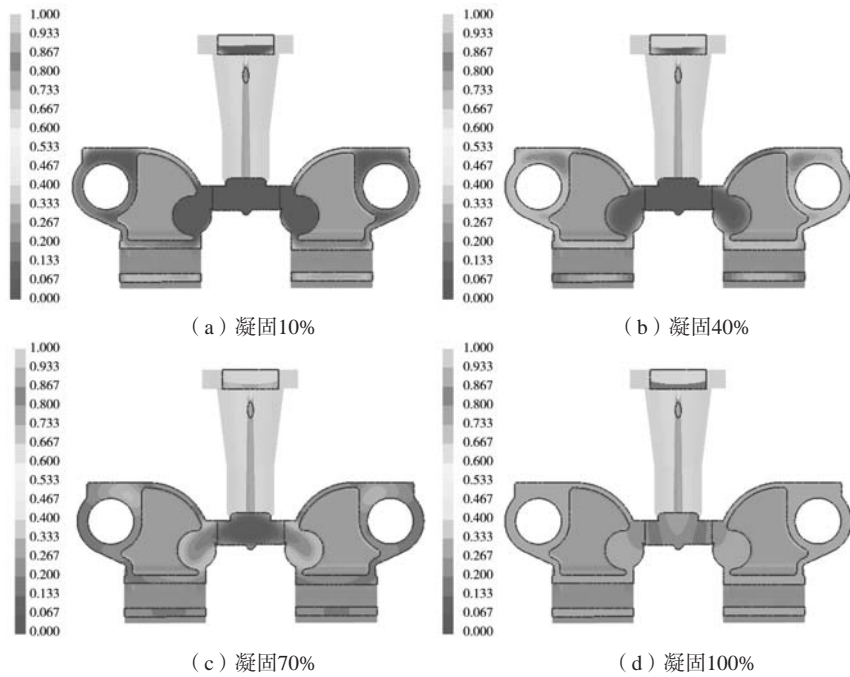


图6 挂架初始方案凝固过程截面

Fig. 6 Solidification process sections of pylon initial casting scheme

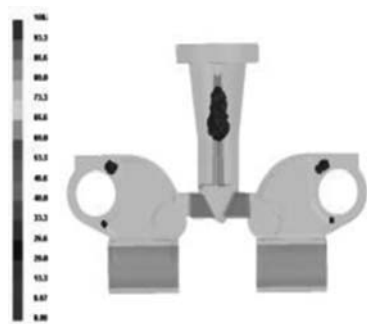


图7 初始方案缺陷大小及分布

Fig. 7 Size and distribution of simulated defects using initial scheme

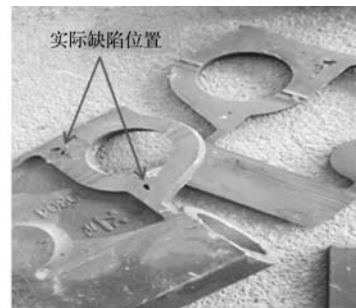


图8 铸件实际缺陷位置

Fig. 8 Actual defect locations of casting produced using initial scheme

### 3 工艺方案优化与结果分析

#### 3.1 工艺参数优化

以缩松缩孔为观察指标, 期望通过设计正交试验来获得最优的浇注工艺参数。由于铸件材料为ZG270-500, 其在成形过程中易形成魏氏体组织、易氧化、收缩率大、流动性差等问题, 因此浇注速度的影响不可忽略, 过慢的浇注速度会引起浇不足, 而过快的浇注速度则容易形成卷气, 而在这个过程中浇注温度和型壳温度的影响也不容忽视。此试验主要针对铸件浇不足和缩松缩孔缺陷, 因此最终选择浇注温度(A)、型壳温度(B)和浇注速度(C)为试验参数, 分析单因变量对铸件缩孔、缩松缺陷的影响, 确定所选取正交试验工艺参数范围<sup>[17]</sup>。

图9所示为浇注温度对铸件质量的影响。ZG270-

500的液相线温度为1 500 ℃, 考虑温度损失, 实际浇注温会比液相线温度高50~80 ℃, 试验中应上下浮动选择1 540~1 620 ℃。由图看出, 缺陷整体呈先降后升趋势, 钢液浇注温度过低, 其流动性变差、黏度变大, 缩孔缩松缺陷较多, 随着浇注温度的提升, 金属液流动性得到改善, 缺陷减少, 而浇注温度不断升高会使合金在液相转变为固相时的收缩变大, 导致结晶组织粗大<sup>[18]</sup>。图10所示为型壳温度对铸件质量的影响。熔模铸造中型壳预热对促进钢液流动性有很大帮助, 图中显示随着型壳温度升高, 缺陷体积有明显的减少并趋于平稳。图11所示为浇注速度对铸件质量的影响。浇注速度过快会导致钢液进入型腔引起湍流, 形成卷气、铸件浇不足等问题。由图可看出随着浇注速度的增大, 缩松缩孔缺陷不断增多。

根据前文分析结果，建立如表2所示的3因素3水平正交试验表，研究浇注速度、型壳温度和浇注速度工艺参数对铸件质量的影响。设计L9正交试验方案，在初始方案基础上借助有限元模拟软件对各试验进行模拟分析，通过后处理模块统计各组试验的缩松缩孔总体积数值，采用极差法分析试验结果，9组试验模拟结果如表3所示<sup>[19]</sup>。

通过极差分析结果可知，极差大小顺序排列为 $R_C > R_B > R_A$ ，也就是说浇注速度、型壳温度、浇注温度三个因素对最终缩松缩孔总体积的影响力为浇注速度最大，型壳温度次之，浇注温度的影响相对最小。本文以缩松缩孔总体积为评价指标，缺陷体积越小，视为质量最好。因此在总体极差影响顺序下，单个影响因素中K值越小，影响越小，以该值定为最优化水平即可，最终得出的最优化参数方案为 $A_2B_1C_3$ ，与其对应的浇注温度值为1 560 ℃，型壳温度值为700 ℃，浇注速度值为2.5 kg/s，并进行有限元数值模拟，使铸件缺陷降至6.08 cm<sup>3</sup>。

### 3.2 浇注系统优化

初始方案结果显示，挂架在腹板处的厚大部位处

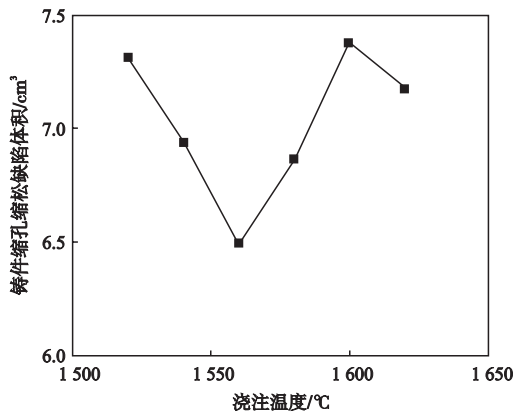


图9 浇注温度对铸件质量的影响  
Fig. 9 Effect of pouring temperature on casting quality

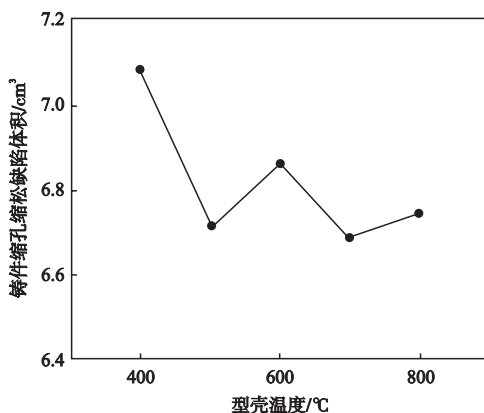


图10 型壳温度对铸件质量的影响  
Fig. 10 Effect of shell temperature on casting quality

于凝固中后期，金属液流动性差于凝固初期，金属液补缩能力更差，加剧了孤立熔池的产生，形成缩松、缩孔以及气孔缺陷，严重影响铸件质量。为了提高铸件的综合品质，在最优化参数方案的基础上进行浇注方案的优化设计，优化后的浇注系统如图12所示，主要改进措施如下：

(1) 初始方案中，挂架腹板顶部和圆环右下角厚大部位处热节在凝固过程中无法得到补缩，破坏铸件顺序凝固，最终形成缩松、缩孔缺陷。针对此缺陷，

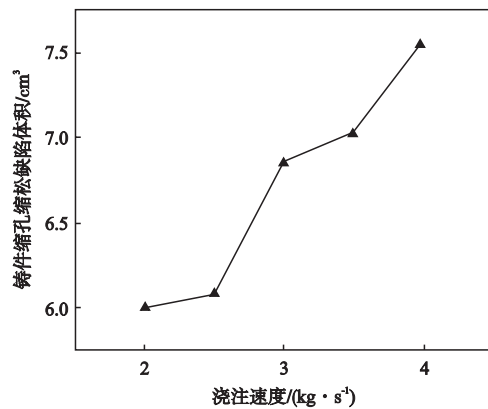


图11 浇注速度对铸件质量的影响  
Fig. 11 effect of pouring speed on casting quality

表2 正交试验影响因素及其水平  
Table 2 Influencing factors and levels of orthogonal test

水平	(A) 浇注温度/℃	(B) 型壳温度/℃	(C) 浇注速度/(kg·s <sup>-1</sup> )
1	1 580	700	3.5
2	1 560	600	3
3	1 540	500	2.5

表3 正交试验缩松、缩孔体积  
Table 3 Volume of shrinkage and porosity in orthogonal test

水平	浇注温度/℃	型壳温度/℃	浇注速度/(kg·s <sup>-1</sup> )	缺陷总体积/cm <sup>3</sup>
试验1	1 (1 580)	1 (700)	1 (3.5)	7.192
试验2	1 (1 580)	2 (600)	2 (3.0)	7.264
试验3	1 (1 580)	3 (500)	3 (2.5)	6.101
试验4	2 (1 560)	1 (700)	2 (3.0)	6.553
试验5	2 (1 560)	2 (600)	3 (2.5)	6.988
试验6	2 (1 560)	3 (500)	1 (3.5)	6.923
试验7	3 (1 540)	1 (700)	3 (2.5)	6.498
试验8	3 (1 540)	2 (600)	2 (3.0)	6.940
试验9	3 (1 540)	3 (500)	1 (3.5)	7.271
均值K <sub>1</sub>	6.852	6.748	7.129	
均值K <sub>2</sub>	6.821	7.064	6.919	
均值K <sub>3</sub>	6.903	6.765	6.529	
极差	0.082	0.316	0.60	

在挂架顶部厚大部位处的侧面增加圆台形冒口，在挂架圆孔下方拐角处的侧面增加球形冒口。

(2) 适当减小了浇道截面尺寸，横浇道的截面积为37 mm × 37 mm × 37 mm，内浇道尺寸为38 mm × 32 mm × 20 mm；适当延长横浇道长度而形成浇道窝，由290 mm增加到330 mm，起到缓冲金属液和集渣的作用。

### 3.3 优化方案模拟结果分析与验证

图13为优化后工艺方案的凝固过程。由图13a、13b可看出，优化后的浇注方案前期圆筒壁处遵循顺序凝固原则，无明显缺陷产生；图13c显示，设计的两处冒口和内浇道起到补缩的作用，成为最后凝固的部位，促进了铸件的顺序凝固，降低铸件产生孤立熔池的倾向，有效地消除了铸件热节。图14为最终改进方案铸件中缩松缩孔缺陷分布图。从模拟结果可以

看出，挂架腹板顶部和圆孔下方拐角厚大部位的缩松、缩孔缺陷得以消除，缺陷总体积减少到0.15 cm<sup>3</sup>。

在此基础上进行实际铸件试制，所得实物如图15所示。挂架本体无明显的缺陷，与模拟结果一致，证明了该优化工艺方案的可靠性，可用于实际生产。

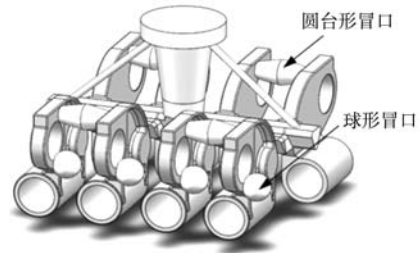


图12 优化后浇注系统  
Fig. 12 Optimized gating system

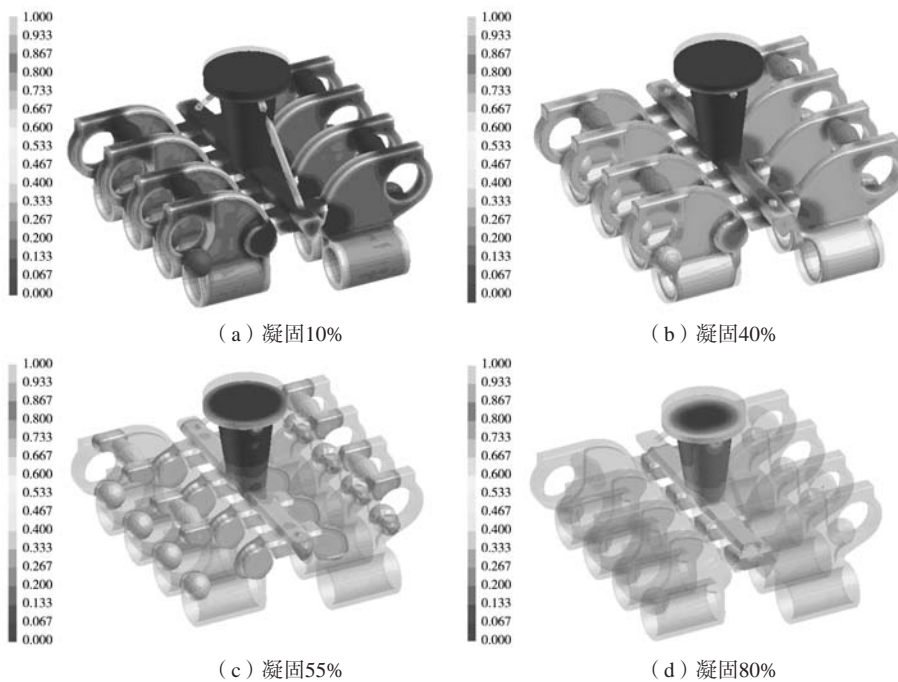


图13 优化方案凝固过程

Fig. 13 Solidification process simulation using optimized scheme

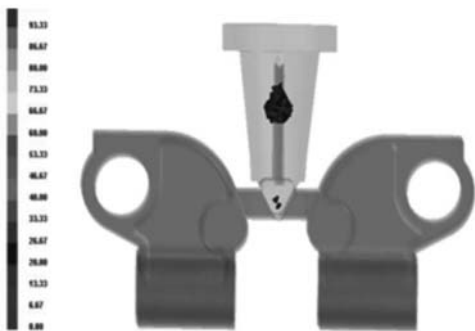


图14 优化方案缺陷大小及分布

Fig. 14 Size and distribution of simulated defects using optimization scheme



图15 优化方案实际铸件图

Fig. 15 Actual casting produced using optimization scheme

## 4 结论

(1) 采用以铸代焊工艺方法, 结合挂架的结构特点, 设计初始熔模铸造工艺方案, 模拟结果显示缺陷主要分布在挂架腹板和圆孔处, 总体积为 $7.26 \text{ cm}^3$ 。通过试生产, 发现实际缺陷位置与模拟结果一致, 证明了初步方案的可靠性。

(2) 分析熔模铸造工艺中浇注温度、型壳温度、浇注速度对铸件质量的影响规律, 根据各工艺参数缺

陷值趋势选取合理参数范围, 设计正交试验得到最优工艺参数: 浇注温度 $1560 \text{ }^\circ\text{C}$ , 型壳温度 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ , 浇注速度 $2.5 \text{ kg/s}$ , 经有限元模拟得缺陷总体积为 $6.08 \text{ cm}^3$ 。

(3) 通过在铸件热节处增设冒口, 形成补缩通道, 有效消除了铸件内缩孔、缩松等缺陷, 使缩松缩孔体积降低到 $0.15 \text{ cm}^3$ , 并与实际生产验证结果一致, 可为类似结构铸件的工艺制定提供参考。

### 参考文献:

- [1] 梁作俭, 许庆彦, 李俊涛, 等.  $\gamma$ -TiAl增压涡轮熔模铸造过程数值模拟研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2003 (3): 164-169.
- [2] 张逢骏. 叶轮快速成型件的熔模铸造工艺与数值模拟研究 [D]. 江苏: 江苏大学, 2016.
- [3] 蔡虎, 王嘉诚, 付文笙, 等. 基于计算机模拟的支架铸钢件铸造工艺设计及优化 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (4): 153-161.
- [4] 吴冰, 陆皓, 郑洪亮, 等. 阀盖熔模铸造工艺数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (7): 732-734.
- [5] 袁有录, 曾大新, 董艺, 等. 42CrMo复杂铸钢件熔模精铸过程数值模拟及试验研究 [J]. 铸造, 2008 (5): 473-476.
- [6] LIU B C. Progress in solidification modeling of cast iron in China [J]. International Journal of Cast Metals Research, 1999, 11 (5): 259-266.
- [7] 王贵, 杨莉, 周铁涛. 熔模精铸件凝固过程温度场的数值模拟 [J]. 北京航空航天大学学报, 2000 (3): 249-251.
- [8] 于靖, 张新平, 许庆彦, 等. 基于熔模铸造模拟软件的铸钢件工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2004 (5): 36-39.
- [9] 兰宏志, 吕志刚, 姜不居, 等. 跨平台熔模铸造工艺工装CAD [J]. 特种铸造及有色合金, 2001 (1): 19-23.
- [10] HU H J, YANG M B, LUO J, et al. Application of the software ProCAST in the casting of solidification simulation [J]. Materials Science and Technology, 2006, 14 (3): 293-295.
- [11] 胡红军. ProCAST软件的特点及其在铸件成形过程中的应用 [J]. 热加工工艺, 2005 (1): 70-71.
- [12] 李峰. 对ZG270-500铸钢缺陷的思考 [J]. 职业, 2014 (14): 155.
- [13] 聂金成, 谌黎明, 叶洁云, 等. 大型铸钢支架铸造工艺数值模拟与优化设计 [J]. 铸造技术, 2019, 40 (11): 1178-1182.
- [14] 李日. 铸造工艺仿真ProCAST从入门到精通 [M]. 中国水利水电出版社, 2010.
- [15] KOLTYGIN A V, BAZHENOV V E. On features of the computation of shrinkage defects in castings with the use of a ProCAST software package [J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2009, 50 (5): 471-473.
- [16] 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.
- [17] 林颖, 胡清明, 刘斌, 等. 基于正交试验的缸盖罩压铸工艺参数优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28 (12): 935-938.
- [18] 陈军利. 铸钢件浇注温度计算与控制 [J]. 铸造, 2015, 64 (1): 80-82.
- [19] 王成玥, 胡清和, 邓敏杰, 等. 基于数值模拟的压铸锌合金化油器壳工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (8): 850-854.

---

## Optimization of Investment Casting Process for High-Speed Rail Pylon

LIU Ji-guang<sup>1,2</sup>, WANG Dian-fei<sup>1,2</sup>, FANG Xiao-gang<sup>1,2</sup>, WU Tian-yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Ya-mi<sup>1,2</sup>, YANG You-wen<sup>1,2</sup>  
(1.College of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230000, Anhui, China; 2. Engineering Research Center of Ministry of Education for High Performance Copper Alloy Materials and Forming, Hefei 230000, Anhui, China)

### Abstract:

As a key part of automatic door drive in rail transit, high-speed rail pylon has high requirements for internal quality and mechanical properties. In view of the defects such as slag and cracks existing in the traditional welding process of pylon, authors put forward the process method of casting instead of welding. According to the structural characteristics of the pylon, the investment casting process scheme of the pylon was designed. The filling and solidification process of the pylon was analyzed by using the finite element simulation software, and the defect position was predicted. The reliability of the process scheme was verified by actual production and the defect position in actual production was compared with the simulated results. In order to further reduce the defects such as shrinkage and porosity, the orthogonal test was used to obtain the optimal process parameters, and the cone-shaped and spherical risers were designed respectively for feeding, so that the casting defects were reduced from 7.26 cm<sup>3</sup> to 0.15 cm<sup>3</sup>. The results show that high quality pylon castings can be obtained by using the optimized process. The process design idea can provide a reference for the production of investment castings with similar structure.

### Key words:

high-speed rail pylon; investment casting; numerical simulation; process parameter optimization

---