

大型框架铸钢导轨铸造工艺设计与优化

杨清¹, 李爽¹, 王旭¹, 高占勇², 华连庚¹, 孙晓宇¹, 刘亚楠¹, 付超¹, 武玉平¹

(1. 内蒙古第一机械集团有限公司, 内蒙古包头 014032; 2. 内蒙古科技大学, 内蒙古包头 014010)

摘要: 在对某装备铸钢导轨的结构特点和铸造工艺难点进行分析的基础上, 对铸件的初始工艺进行试制和验证, 并针对初始工艺铸件产生的浇不足、冷隔、缩孔、缩松和变形等缺陷, 利用ProCAST三维数字化仿真模拟软件对铸件的凝固过程进行了仿真模拟和变形规律分析, 并根据仿真模拟分析结果制定了改进措施, 工艺改进后生产的导轨铸件浇不足、冷隔、缩孔、缩松等缺陷得到了很好的解决, 变形量也得到了有效的控制, 加工后导轨铸件整体结构和尺寸符合图纸设计要求。

关键词: 铸造; 大型框架; 导轨; 变形; 模拟

某装备铸钢导轨零件属于典型的大型框架类结构, 尺度大、结构复杂, 且在尺寸精度、材料内部组织方面要求高, 采用一体化铸造成形、整体精密加工是实现此类零件高效批量生产的理想方法。

本研究在分析铸钢导轨零件结构及材料特性的基础上, 从浇注位置的确定及分型面的选择、浇注系统设计、冒口参数的设计、浇注温度的选择、铸件收缩率的控制等方面对铸造方案进行了系统设计, 通过铸造工艺试制, 摸索出了铸造流程参数、砂型结构参数与铸件缺陷的关系, 并经仿真模拟综合优化, 提炼出了砂型铸造大型框架类铸件一体化铸造成形工艺及防止热处理变形的措施, 解决了某装备研制生产中的难题, 所总结形成的铸造工艺设计方案和铸造工艺参数具有很好的应用推广价值。为公司今后大型框架类结构件以铸代焊奠定了坚实的基础, 并为行业生产大型框架类结构铸钢件提供了技术借鉴。

1 铸件结构特点、技术要求及技术难度

1.1 结构特点

导轨铸件结构如图1所示, 结构特点如下。

(1) 铸件为“平板”状镂空结构, 筋条纵横交错, 结构复杂、尺寸大, 其轮廓尺寸为1 596 mm × 501 mm × 444 mm, 属于典型的大型框架类结构。

(2) 铸件壁厚不均, 最小壁厚为18 mm, 最大壁厚为51 mm。

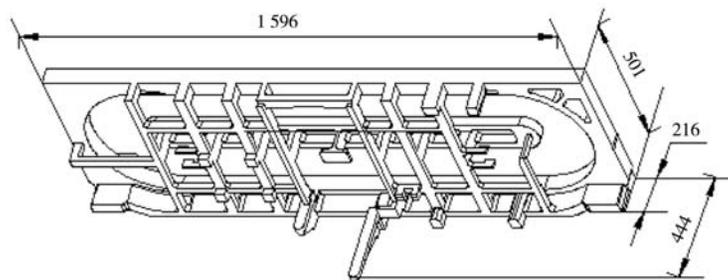


图1 某装备导轨铸件

Fig. 1 An equipment guide rail casting

作者简介:

杨清(1983-), 男, 工程师, 从事铸造技术及现场工艺开发工作。电话: 13848629201, E-mail: wuyuping5639678@163.com

通讯作者:

李爽, 女, 硕士。电话: 15848604420

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)09-1163-06

收稿日期:

2021-12-16 收到初稿,
2022-01-27 收到修订稿。

1.2 技术要求

(1) 导轨行走面不允许毛坏有任何的铸造缺陷, 保证机械加工的精度要求。

(2) 导轨使用过程中使用面承受较大冲击载荷和疲劳载荷, 铸件对力学性能与疲劳性能要求高, 铸件其余部位不允许有影响零件使用的铸造缺陷。

导轨的工作性能和使用要求决定了只能采用铸造成形方式。

1.3 铸造难点分析

1.3.1 铸件充型困难

查阅铸造工艺手册可知, 低合金结构钢的最大轮廓尺寸为1 250~2 000 mm时, 砂型铸造铸钢件的最小壁厚为20 mm, 液态金属表面张力引起的拉普拉斯力会严重影响充型液体的流动状态, 并且粘滞力的作用也凸显^[1]。导轨铸件的材质为ZG32MnMo, 导轨铸件长度为1 596 mm, 介于1 250~2 000 mm之间, 拉普拉斯力降低了钢液的充型能力, 同时由于铸件充型路径复杂且较长, 导致热量散失严重, 这两个因素造成了铸件完整充型困难, 是导轨铸件成形研制难点之一。

1.3.2 铸件尺寸精度较难控制

导轨铸件轮廓长度达1 596 mm, 结构复杂, 缺乏相关的指导性文件参考, 如果对铸型材料的强度和金属材料收缩率的匹配掌握不准确, 较难满足铸件的精度要求, 同时铸件属于“平板”类镂空结构, 筋条纵横交错分布、壁厚不均, 容易形成内应力导致铸件变形, 尺寸精度不易控制, 而且热处理也容易导致其变形。因此, 铸件尺寸精度控制是本研究的难点之一。

1.3.3 铸件内部质量难以控制

导轨铸件筋条纵横交错, 且存在多处壁厚过渡突变的地方, 补缩困难, 易产生缩孔和缩松缺陷。另外, 导轨铸件的整体外轮廓大、结构复杂, 导致金属液的充型路径复杂, 金属液流动路径长带来的铸件不同部位性能的一致性控制较难, 对热处理工艺要求较高。

2 铸造工艺方案总体设计

导轨铸件的铸造工艺方案按照通常的铸件工艺技术路线进行设计, 本文主要从浇注位置的确定及分型面的选择、浇注系统设计、冒口参数的设计、浇注温度的选择, 以及铸件收缩率的控制等以下方面进行研究分析, 并根据其分析研究确定工艺方案和工艺参数。

2.1 浇注位置的确定及分型面的选择

确定浇注位置是铸造工艺设计中重要的一环, 关系到铸件的内在质量、铸件的尺寸精度及造型工艺过程的难易。根据导轨铸件的结构特点, 选择导轨框架大平面为浇注位置。这样有利于铸件整体都位于下箱, 克服铸件错箱问题, 保证了铸件的精度, 同时有利于金属液实现顺序凝固, 得到组织致密的铸件。

分型面主要是为了取出模样而设置的, 所以在选择浇注位置之后, 结合工装和造型方式, 确定了分型面与浇注位置相同, 其分型面设置简图如图2所示。这样选择分型面具有几方面的特点: 第一, 使铸件整体处于下箱, 有效避免了由于工装精度差导致的铸件尺寸精度差的问题; 第二, 有利于较少铸件的砂芯数量; 第三, 有利于下芯、合箱和型腔尺寸的检查; 第四, 浇注位置和分型面选择相同的位置, 可以减少模具制作和造型的难度。

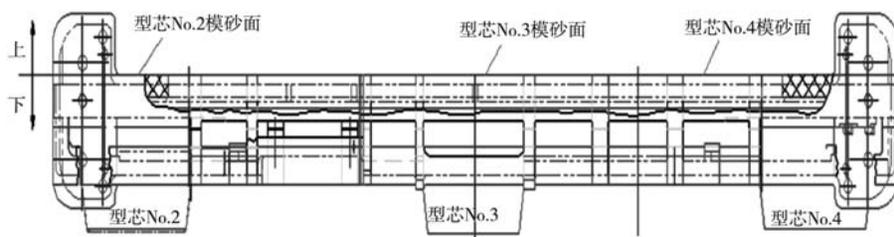


图2 导轨浇注位置和分型面选择简图

Fig. 2 Diagram of guide rail pouring position and parting surface selection

2.2 浇注系统设计

铸钢的浇注温度高、流动性差, 钢液对砂型的热冲击和冲刷力强, 所以采用低温快浇工艺。根据浇注手段和铸件重量, 采用底注包浇注。以底注包浇注的铸钢件均采用开放式浇注系统, 以包孔截面积作为控流截面积, 记以其为1, 按如下比例关系便可计算出浇注系统各单元的截面积: $F_{包孔} : F_{直} : F_{横} : F_{内}$

$= 1 : (1.8 \sim 2.0) : (1.8 \sim 2.0) : (2.0 \sim 2.5)$ ^[2]。根据实际工装选择包孔 $\Phi 45$ mm, $F_{包孔} = 15.9$ cm²; $F_{直} = 2.0 \times 15.9 = 31.8$ cm², 选择 $\Phi 60$ mm的直浇道; $F_{横} = 2.0 \times 15.9 = 31.8$ cm²; 采用搭接式, 可以有效集渣和集砂; $F_{内} = 2.5 \times 15.9 = 39.8$ cm²; 内浇口从冒口引入, 并采用扁宽式, 避免金属液的紊流造成的卷气和卷渣。

2.3 冒口参数的设计

铸件的凝固时间，取决于其体积与表面积之比，这一比值称为“凝固模数”，简称“模数”，用式(1)表示^[3]。

$$M = \frac{V}{A} \quad (1)$$

式中： M 为模数， cm ； V 为铸件体积， cm^3 ； A 为铸件散热表面积， cm^2 。

研究表明，各种形状、重量、用途不同的铸钢件，不论铸件形状如何，只要其模数相等，凝固时间就相等或相近。模数小的铸件凝固时间短，模数大的铸件凝固时间长。

铸件中缩孔的位置是在铸件最后凝固的部位。铸件各个部位的凝固时间取决于该处的体积与表面积之比，即取决于该处的模数。

基于以上理论知识，本研究采取了模数法和经验法对冒口进行设计。利用Croe2.0分体功能和分析功能计算了铸件各平板位置的模数，选取位置如图3所示，计算结果如表1所示。

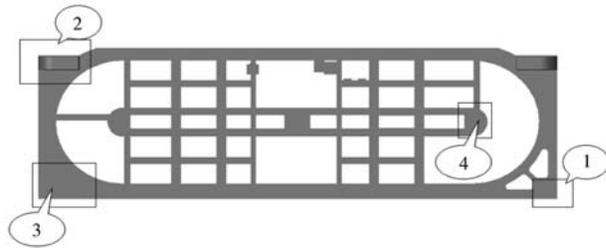


图3 采用模数法设计冒口位置

Fig. 3 Riser positions based on the modular design method

表1 各位置冒口模数
Table 1 Modules of risers at different positions

项目	体积/ cm^3	表面积/ cm^2	模数/ cm
整体铸件	26 904.60	24 299.62	1.11
区域1	308.57	275.00	1.12
区域2	1 903.57	1 181.05	1.62
区域3	1 294.63	786.02	1.65
区域4	417.88	473.31	1.00

根据模数法计算可知，铸件这四个部位的模数和铸件整体的模数相差不大，说明铸件的各部位凝固是同时凝固的，不能实现顺序凝固，只可能在冒口的延续度范围内实现顺序凝固。因此，结合计算的模数和实际经验，制定了如图4所示的铸造工艺。

根据铸造工艺方案，计算浇注速度。依据铸造工艺学浇注系统设计理论，底注包浇注的铸钢件应采用开放式浇注系统，以包孔截面积作为控流面积时，浇注时间按式(2)计算。

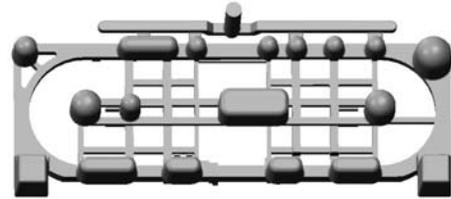


图4 导轨铸造工艺

Fig. 4 Casting process of guide rail

$$t = \frac{G_L}{Nnq} \quad (2)$$

式中： t 为浇注时间， s ； G_L 为型内钢液重量， kg ； N 为同时浇注的浇包数，个； n 为每个漏包的浇注孔数，个； q 为平均浇注速度， kg/s 。

根据工艺及工装特点，取 $G_L=330 \text{ kg}$ 、 $N=1$ 、 $n=1$ 、 $q=30 \text{ kg/s}$ 代入上述公式，计算出 $t=11 \text{ s}$ ，根据实际情况取浇注时间为10~14 s。

2.4 浇注温度的选择

根据图纸要求，导轨铸件的材质为ZG32MnMo。根据图5所示的ZG32MnMo温度与固相率的关系可知，其液相线温度为1 503 $^{\circ}\text{C}$ ，固相线温度为1 448 $^{\circ}\text{C}$ 。

采用底注包浇注时，结合铸件结构特点，为保证铸件充型良好，综合考虑确定其浇注温度为1 580~1 600 $^{\circ}\text{C}$ 。

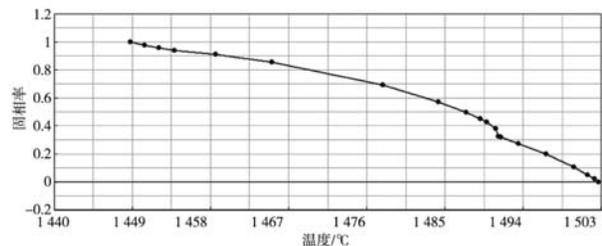


图5 ZG32MnMo温度与固相率的关系

Fig. 5 Relationship of temperature and solid phase ratio of ZG32MnMo

2.5 铸件收缩率的控制

铸造收缩率是金属液凝固和冷却过程收缩，使铸件各部分的尺寸小于模样原来的尺寸。因此，为使铸件冷却后的尺寸与铸件图示尺寸一致，需要在模样或芯盒上加上其收缩的尺寸。

考虑到该铸件结构复杂，铸件收缩设定不当会导致铸件（模具）报废，需要通过一定的试验探索其收缩受阻状态。在设计工艺时，考虑到铸件各部分的收缩不同，通过采取不同的铸造收缩率，以保证铸件尺寸符合图纸要求。根据铸件结构特点及以往的生产经验，内腔长度方向及宽度方向铸造收缩率设定为1.8%，高度方向收缩率设定为2%，其他标有公差尺寸均按中限尺寸制作，防止尺寸超差。

3 导轨铸件工艺试制

在确定工艺方案及工艺参数后，制作了相应的金属工装模具、芯盒，采用规格为1 920 mm × 670 mm × 350/400 mm的专用砂箱，在保证铸件的吃砂量的同时，尽量减少砂的消耗量，减少砂型气阻，提高砂型的排气能力；型砂工艺采用“邦尼”树脂砂，手工造型和手工制芯，砂型和砂芯涂敷锆英粉醇基涂料。

导轨铸件的材质为ZG32MnMo，采用公司现行的3T碱性电弧炉冶炼、5 t底注包，在树脂砂柔性造型生产线上按初始铸造工艺方案进行了4箱/4件导轨铸件的工艺试制，经对工艺试制的导轨铸件划线解剖、试加工等环节检验检测，确认导轨铸件存在以下的铸造缺陷：

(1) 在导轨铸件上平面中间及边缘部位均有浇不足和冷隔缺陷；

(2) 经对导轨铸件解剖，发现在两侧侧板处及中间导轨面两端有缩孔缺陷，其余部位未发现缩孔、缩松缺陷，如图6所示；



图6 导轨铸件试加工缺陷

Fig. 6 Defects in guide rail casting trial process

(3) 导轨铸件个别连接筋的拐角处存在热裂纹；

(4) 导轨铸件长度方向内腔尺寸全部偏大，尺寸超差；

(5) 导轨铸件存在变形，且试制的4个导轨铸件在导轨面四角全部存在向上翘曲的现象，如图7所示。



图7 导轨铸件的变形

Fig. 7 Deformation of the guide rail casting

4 铸件缺陷原因分析

针对导轨铸件工艺试制存在的铸造缺陷产生原因进行了分析，具体结果如下：

(1) 导轨铸件上平面中间及边缘部位均有浇不足和冷隔缺陷。主要是由于导轨铸件的结构复杂，壁厚差异大和轮廓尺寸大，导致金属液充型过程中，液相前端热量散失严重，充型阻力大，才出现远端出现浇不足和冷隔现象。

(2) 导轨铸件个别连接筋的拐角处有热裂纹。导轨铸件的热裂纹产生的主要原因是由于在金属液凝固收缩过程中，由于型芯阻碍形成的内应力大于金属材料在此温度下对应的屈服强度造成塑性变形，而又无法得到金属液的补缩而产生的。

(3) 导轨铸件尺寸超差现象。导轨铸件由于各部位的壁厚不均，内腔均由砂芯形成，收缩受阻加大，导致线收缩率不一致，内腔长度方向铸件尺寸超差是由于初始设计的1.8%收缩率未能保证铸件长度方向的收缩受阻状态，造成内腔长度方向尺寸全部偏大，出现尺寸超差现象。同时由于此铸件属于“镂空”薄板类铸件，在金属液凝固和冷却过程中要发生受阻收缩，其受阻的力主要来源于砂芯的阻碍和铸件各部分收缩的内应力，导致最初设定的收缩率不符合实际情况。

(4) 导轨铸件变形。试制的4个导轨铸件全部在导轨面四角存在向上翘曲的现象，如图7所示，造成铸件向上翘曲的主要原因是冒口凝固形成的应力，在浇注结束之后，最后凝固的必然是冒口，而冒口整体位于上箱，且尺寸较大的冒口位于导轨长度方向的两侧，这样在冒口凝固后期，会对其周围的铸件形成一个向上的拉力，导致了导轨铸件两端向上的翘曲变形。

5 铸造工艺改进方案及验证

针对导轨铸件初始工艺试制存在的问题，对初始铸造工艺方案进行工艺改进和优化，并制定了改进措施，具体改进工艺措施如下：

(1) 改变浇注系统的位置，浇注后期进行补浇。浇注系统由铸件外侧改进为铸件的内侧，内浇道由原来的边冒口引入，改进为由边冒口和中间冒口同时引入，这样金属液充型过程中流动的距离缩短，热量散失减少，有利于铸件的充型。

在浇注过程中进行补浇，避免铸件浇不足、冷隔等铸造缺陷的产生。

(2) 优化冒口设置，采取反变形量措施。针对分散式小冒口对铸件补缩效果差，以及分散式小冒口的分散分布，造成了分散性的应力集中区域，容易造成铸件变形等问题。采取了整体式冒口，此类型的冒口可以对铸件形成良好的补缩作用，同时整体式冒口凝固相对缓慢，通过型腔的阻碍收缩，可以有效减少铸

件的变形量。

结合导轨铸件初始工艺依赖经验设计，试制的铸件所产生的缺陷和反映出的问题，并考虑到凝固过程中的应力和变形规律难以实际测量，本研究采用ProCAST三维数字化仿真模拟软件对其应力进行了模拟，其结果如图8所示。

由图8导轨铸件凝固之后的有效应力分布可知，通过浇注系统的改进和冒口的整体优化后，铸件的整体应力分布趋于一致，只有在个别圆角处形成应力集中，其主要应力集中为251 MPa，而在此应力下铸件是否会形成裂纹与铸件所使用的材质在凝固过程中温度与屈服应力对应有关。图9为ZG32MnMo温度与屈服强度的关系。

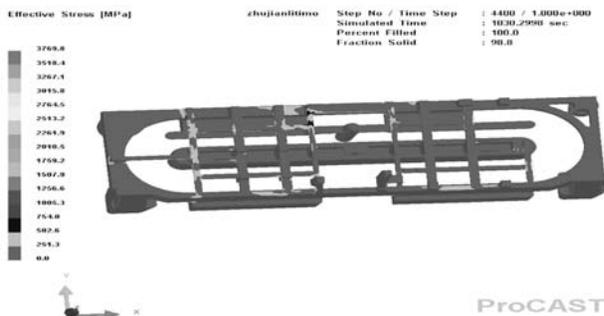


图8 导轨铸件的有效应力分布
Fig. 8 Effective stress distribution of the rail casting

由图9可知，ZG32MnMo的屈服强度随温度的降低在增加，最终可以达到420 MPa，远大于铸件凝固结束之后的应力251 MPa，说明铸件的应力通过整体式冒口之间的相互协调作用得到了很好的解决。

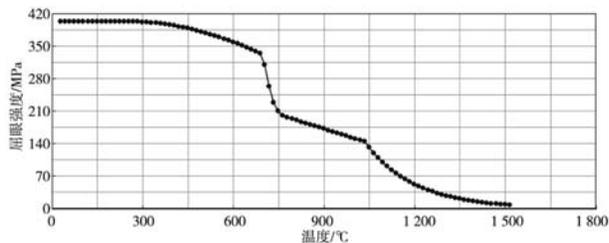


图9 ZG32MnMo温度与屈服强度的关系
Fig. 9 Relationship on the temperatures and yield strength of ZG32MnMo

图10为铸件平均应力模拟结果。可以看出，在导轨的下平面的四角处，由于冒口最后凝固对此部位形成向上的拉应力，造成此处向上翘曲变形。

根据模拟结果，在两侧与中间冒口之间增加拉筋并将四个角处底部增加4 mm反变形量，抵消由变形产生的尺寸超差。优化之后的铸造工艺如图11所示。

(3) 铸件尺寸超差改进措施。根据模具尺寸和

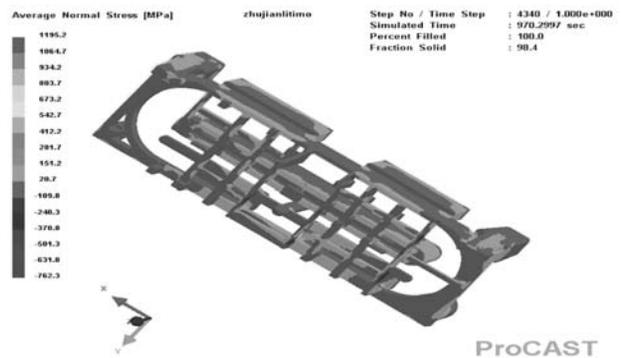


图10 导轨铸件平均应力分布结果
Fig. 10 Average stress distribution results of the guide rail casting

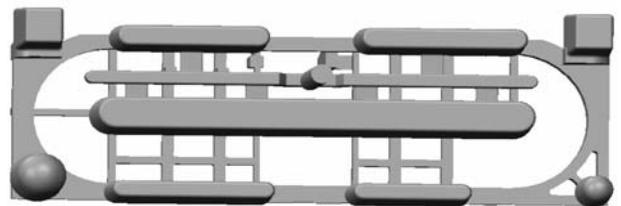


图11 导轨优化之后的铸造工艺
Fig. 11 Casting process after optimization of the rail

试制铸件的尺寸换算比例，长度方向内腔的收缩率设定为1.5%，对模具进行相应的调整，同时改进铸件热处理的摆放方式，将平放改进为立放，并且铸件与托盘用钢筋棍焊接加固，以防止由热处理产生的二次变形，铸件热处理后去除，具体摆放方式如图12所示。

(4) 铸件热裂预防措施。针对导轨铸件个别连接筋的拐角处热裂纹，又无法得到金属液的补缩而产生的情况，在产生裂纹缺陷处加大铸造圆角（由R5加大至R10）并放置铬矿砂，对此部位形成激冷，避免圆角处的应力集中。



图12 导轨铸件热处理摆放方式及工装
Fig. 12 Placement method and tooling of the rail casting heat treatment

6 实施效果

工艺改进和优化后进行了4箱/4件试制，经对改进

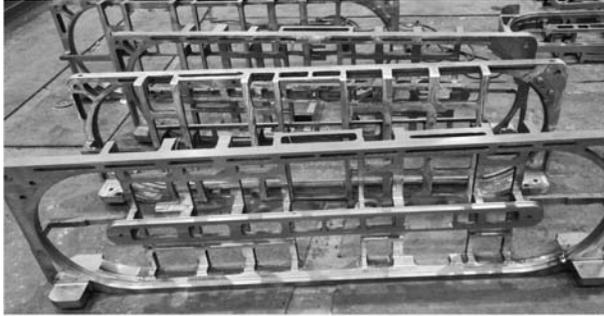


图13 导轨加工后的表面质量

Fig. 13 Surface quality after processing of the guide rail

工艺试制的2件导轨铸件解剖，解剖结果表明，断面组织致密，缩松缺陷被完全消除；其余2铸件划线，其变形量也得到了良好的控制，加工后导轨铸件整体结构和尺寸符合图纸设计要求，目前导轨已成功装配于某

型装备，图13为导轨加工后的表面质量。

在此基础上进行了批产，经交付到下道机加工工序加工和整车装配验证，满足了整车设计要求。

7 结束语

本研究摸索出大型复杂框架类结构铸件的铸造成形工艺，并研制出了大型框架结构铸钢导轨铸件，该研究成果为今后研制此类铸件积累了一定的技术经验，填补了工厂的一项技术空白，突破了行业内大型框架类结构高端铸件铸造成形关键技术，并实现了工厂外协件由外协到自主研发、转产研制和批产的战略调整，提高了某装备整车的厂内自制率，进而降低了制造成本，提高了经营效果，是精益生产的具体实践。

参考文献:

- [1] 李晨希. 铸造工艺及工装设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [2] 王文清, 李魁盛. 铸造工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 陈宗民, 于文强. 铸造金属凝固原理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2014.

Casting Process Design and Optimization of Large Scale Frame Casting Steel Guide Rail

YANG Qing¹, LI Shuang¹, WANG Xu¹, GAO Zhan-yong², HUA Lian-geng¹, SUN Xiao-yu¹, LIU Ya-nan¹, FU Chao¹, WU Yu-ping¹

(1. Inner Mongolia First Machinery Group Co., Ltd., Baotou 014032, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract:

On the basis of the analysis of the structural characteristics and casting process difficulties of a certain equipment casting steel guide, the initial process of the cast steel guide was designed and a few castings have been trial-produced. To eliminate casting defects such as misrun, cold laps, shrinkage, dispersed shrinkage and deformation due to the initial casting process, the solidification process and the deformation law of the cast were simulated by means of the ProCAST three-dimensional digital simulation software. The new casting process was designed based on simulation results and the above-mentioned cast defects have been solved. The deformation of the cast has been effectively controlled, and its overall structures and size of the cast after machining met the design requirements of the drawings.

Key words:

casting; large frame; rail; deformed; simulation