

某箱体的铸造工艺缺陷分析与优化设计

马 聪, 杨梦馨, 程 强, 初红艳

(北京工业大学材料与制造学部, 北京 100124)

摘要: 以某种提升箱体为铸造工艺设计对象, 通过对其结构功能性分析, 为其设计了顶注式和底注式两种浇注系统, 并使用ProCAST模拟软件对两种浇注系统进行数值模拟与对比分析后, 选择了底注式浇注系统。针对底注式浇注系统进行了两次工艺优化, 先后分别增设了发热保温冒口、出气孔和冷铁。经模拟分析证实优化措施有效, 铸件的铸造缺陷出现的概率大大降低。

关键词: 铸钢; 砂型铸造; ProCAST模拟; 底注式浇注系统; 优化分析

砂型铸造作为铸造行业中基本的铸造工艺方法, 因为其制造成本低廉, 取材方便, 工艺简单, 可操作性强, 而在制造业中得到广泛应用^[1]。但是因为铸造工艺的灵活性, 如何选择并制定科学合理, 经济环保且又便于实施的工艺方案仍然是在实际生产实践中的一个重点关注问题^[2-5]。提升箱体主要涉及石油机械技术领域。石油开采时, 油气会从储存层流到开采的井底, 再从井底上升至井口。开采前需要通过转杆带动钻头进行钻孔, 再将转杆从孔内抽出, 将抽油用的泵从进油管插入, 进行开采。提升箱体的主要作用是对于转杆和后续的各种开采用物资的提升。因为是主承载件, 故工作时对其强度和稳定性有很高的要求。基于此, 本文针对提升箱体的结构性能与工作特点的分析, 利用ProCAST软件进行数值模拟与比较分析, 为其制定出一套具有合理工艺参数和高效浇注系统的砂型铸造工艺方案, 用以指导生产合格的提升箱体铸件^[6]。

1 零件总体分析

1.1 零件结构分析

该零件外轮廓尺寸为1 040 mm × 760 mm × 933 mm, 材质为ZG25CrNiMo, 密度按一般铸钢件7.85 g/cm³进行工艺设计, 最大壁厚约为187 mm, 最小壁厚为45 mm, 零件三维模型如图1所示。用UG软件对零件壁厚分布分析如图2, 可以看出, 零件大端的壁厚更厚, 大端壁厚均匀无大的热节。

作者简介:

马聪(2001-), 男, 本科生, 专业为机械工程。电话: 19893324624, E-mail: mc19893324624@126.com

中图分类号: TG245

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2023)05-0582-06

基金项目:

北京工业大学“课程思政”示范课程培育项目(048000514122613); 国家自然科学基金项目(No.51975012)。

收稿日期:

2022-04-06 收到初稿,
2022-05-26 收到修订稿。

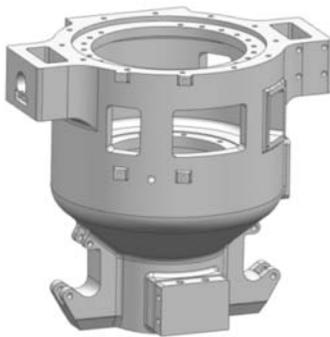


图1 铸件三维图

Fig. 1 3D drawing of the casting



图2 铸件壁厚分布图

Fig. 2 Wall thickness distribution of the casting

1.2 零件材质分析

铸件材质为低合金钢ZG25CrNiMo，具有较好的韧性，较高的抗拉强度，优良的抗疲劳特性，其化学成分如表1。

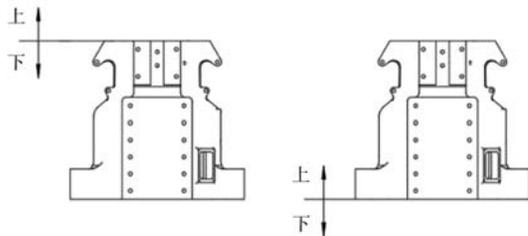
表1 ZG25CrNiMo的化学成分
Table1 Chemical composition of the ZG25CrNiMo $w_B/\%$

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
0.22~0.30	0.30~0.60	0.7~1.00	0.60~0.90	0.60~1.10	0.35~0.50	其他

2 浇注位置和分型面的选取

浇注位置选取与分型面同位置，分型面选择的合理与否，直接关系到铸件的质量，故对于提升箱体结构特点，对分型面选取方案进行如下分析。

方案1铸件全部置于下型，尺寸精度较好；垂直砂芯下芯定位准确；两箱水平分型，手工造型较方便。但不便于起模，需增加较多活块或砂芯（图3a）。方案2铸件全部位于上型，具有方案1的优点，且只需增加少量活块或砂芯，铸型起模方便，故选择方案2（图3b）。



(a) 小端上平面分型 (b) 大端下平面分型

图3 分型面方案

Fig. 3 Parting face solution

3 浇注系统设计

3.1 浇注系统设计方案

通过对浇注位置和分型面位置方案2的选择，铸件浇注系统可以采用底注式和顶注式。底注式浇注系统因为上型高度达1 m以上，为了造型方便，使用铸钢件常用的陶瓷管直浇道和木模形成的横浇道与多条并联内浇道，避免内浇道附近热量集中；顶注式浇注系统为了保证铸件上部温度更高，使顺序凝固更明显，全部采用陶瓷管浇注系统。根据铸件重量，采用漏包（底注式）浇注。

3.2 两种浇注系统断面积的确定

用漏包（底注式）浇注铸钢件时，选择开放式浇注系统。

(1) 底注式浇注系统相关计算。包孔直径50 mm， $\Sigma A_{包}=19.6 \text{ cm}^2$ ，选择陶瓷管直浇道为70 mm。 $\Sigma A_{横}=39.2 \text{ cm}^2$ ，横浇道是双向，断面积为19.6 cm²。 $\Sigma A_{内}$

$=43.1 \text{ cm}^2$ ，采用6个内浇道，平均每个内浇道断面积为7.2 cm²。底注式浇注系统断面尺寸如图4所示。

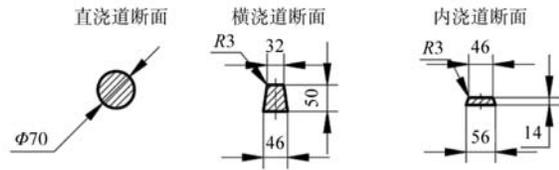


图4 底注式浇注系统断面尺寸 (mm)

Fig. 4 Cross-sectional dimensions of the bottom gating system

(2) 顶注式浇注系统相关计算。包孔直径50 mm， $\Sigma A_{包}=19.6 \text{ cm}^2$ ，选择陶瓷管直浇道为70 mm。 $\Sigma A_{横}=39.2 \text{ cm}^2$ ，横浇道是双向，断面积为19.6 cm²，选择使用直径50 mm的陶瓷管。 $\Sigma A_{内}=43.1 \text{ cm}^2$ ，采用2个内浇道，平均每个内浇道断面积为21.6 cm²，选择使用直径55 mm的陶瓷管。顶注式浇注系统断面尺寸如图5所示。

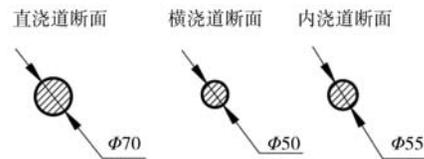


图5 顶注式浇注系统断面尺寸 (mm)

Fig. 5 Cross-sectional dimensions of the top gating system

4 数值模拟结果与分析

4.1 模拟前处理

使用NX1847建立铸件、浇口杯和各浇道的三维模型，导出通用格式之后导入ProCAST并划分网格，方案1底注式浇注系统网格总数为1 160 633个，方案2顶注式浇注系统网格总数为897 227个，然后进行模拟仿真。浇注温度为1 550 ℃，浇注时间为40 s，砂型是碱性酚醛树脂砂，原砂是硅砂，金属与砂的热交换系数确定为500 W/(m²·K)。砂芯和砂型都是同一种材质。

4.2 充型分析与缺陷分析

对方案1、方案2进行充型分析和缺陷分析，结果如图6、7、8所示。

两种方案浇注过程中的横浇道均处于充满状态。但是方案2顶注式浇注系统在充型时落差太大，金属液有明显的飞溅，会直接冲击砂芯，容易造成掉砂；而方案1底注式浇注系统充型平稳有序，充型效果明显更好。时间上两个方案充型用时都接近40 s，符合设置要求。浇注完成时，方案2顶注式浇注系统上部的缩孔缺陷更少，下部和方案1基本一致。

4.3 浇注系统的选择

通过数值模拟分析可知，方案2的铸件上部缺陷虽然少一些，但是下部缺陷和方案1是一致的，尤其充型

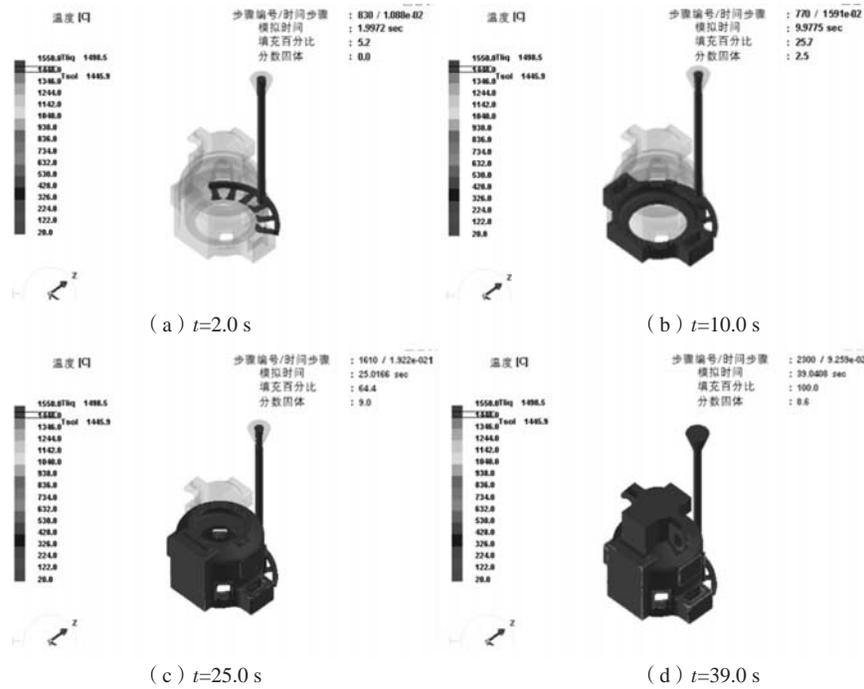


图6 方案1充型分析

Fig. 6 Filling analysis of the scheme 1

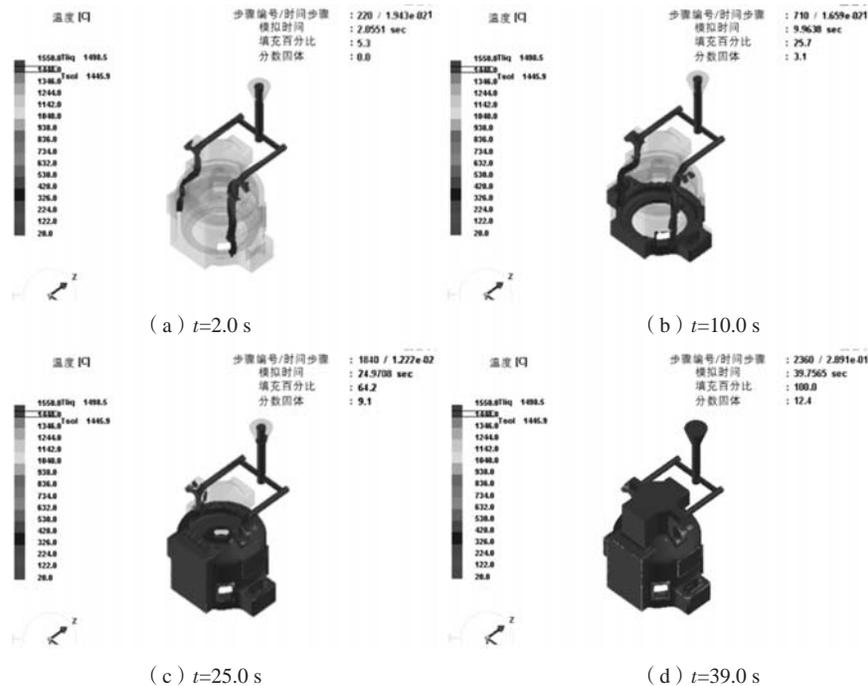


图7 方案2充型分析

Fig. 7 Filling analysis of the scheme 2

不平稳而且容易损伤砂芯，综合考虑后选择方案1底注式浇注系统并对其进行工艺优化。

4.4 初次优化措施

依据模拟分析结果，对铸件浇注系统增加冒口进行补缩。铸件下部因结构约束且为非加工面，不方便

设置冒口，而上部缩孔部位可以设置冒口进行补缩，故将冒口置于上部。

5 冒口设计

5.1 冒口的种类和形状选择

为了方便造型，冒口补缩效果更好，此工艺设计

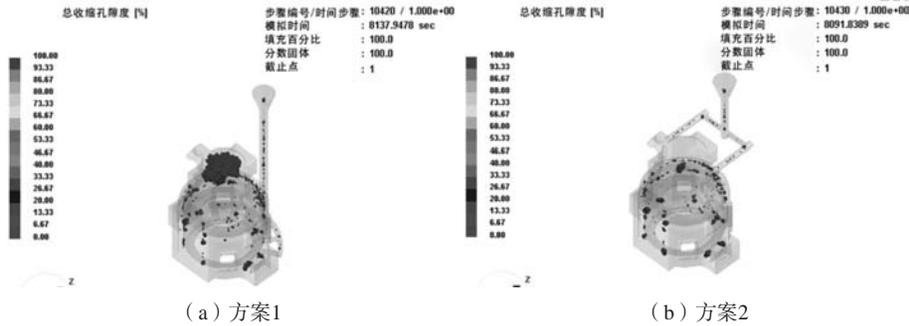


图8 不同方案缺陷分析

Fig. 8 Defect analysis of different schemes

使用发热冒口套，造型后可以不取出，冒口设置为圆形明冒口。此铸件上端壁厚最大，考虑铸件结构尺寸和补缩距离，铸件只需要一个大冒口即可。采用模数法进行发热保温冒口的设计和计算^[7]，具体如下：

$$M_C = V/A \quad (1)$$

式中： M_C 为模数，cm； V 为体积， cm^3 ， A 为传热表面积 cm^2 。此部位的模数 M_C 通过NX三维软件测量体积和

散热面积，如图9，底面为非散热面，所以测量面积时不计算在内，计算得到模数 $M_C=5.8$ cm。

$$M_R = f \cdot M_C \quad (2)$$

式中： M_R 为冒口模数； M_C 为被补缩部分铸件模数； f 为模数的扩大系数，取1.1~1.2，明冒口取1.2； M_R 计算后得7.0 cm。发热保温冒口的模数计算为， $M_{RH} = M_R / 1.43 = 7.0 / 1.43 = 4.9$ cm。

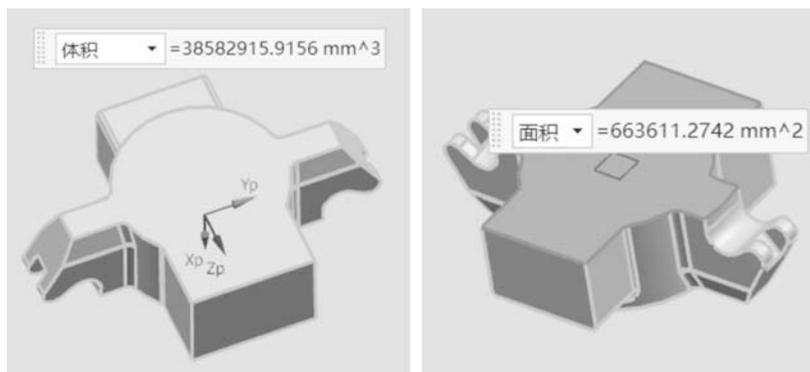


图9 需要补缩部位的三维图

Fig. 9 Three dimensional drawing of the parts requiring feeding

采用直径是300 mm的圆柱形发热保温冒口，冒口高度是300 mm时的模数为5.0 cm，此模数大于计算值，所以选择的发热保温冒口的模数满足要求。发热保温冒口补缩铸件的体积计算如式(3)。

$$V_F = \frac{2}{3} V_{RH} \quad (3)$$

式中： V_F 为发热冒口补缩铸件的体积， dm^3 ， V_{RH} 为发热冒口的体积， dm^3 ，冒口的体积 V_{RH} 为21.20 dm^3 ，计算得发热冒口补缩铸件的体积 V_F 是14.1 dm^3 。铸件的体积是163.1 dm^3 ，金属液的体收缩率 ϵ (%)一般取4.5%~7.0%，此材质取6.13%。铸件凝固体积收缩量： $V_S = 163.1 \times 6.13\% = 10.0$ dm^3 。所以 $V_F > V_S$ ，此发热保温冒口能满足对铸件补缩液量的要求。

5.2 初次优化结果分析和总结

5.2.1 模拟前处理

将三维模型导入ProCAST进行模拟分析，此次模

型增设了发热保温冒口和出气孔，1#大砂芯为空心砂芯，浇注过程中里面为空气，图10中可见发热冒口套、空心砂芯及吊耳砂芯。

5.2.2 固相率分析

利用ProCAST对优化后的系统进行固相率分析，从图11a可以看出，铸件下部两边由于壁厚较厚凝固较慢

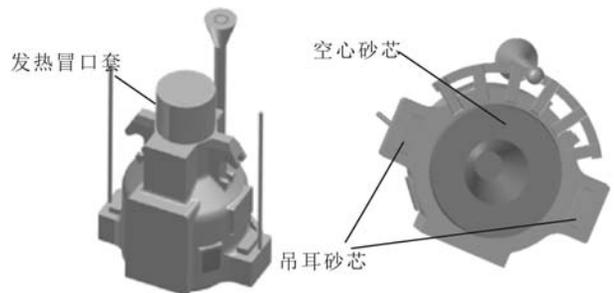


图10 初次优化三维模型

Fig. 10 3D model of the initial optimization

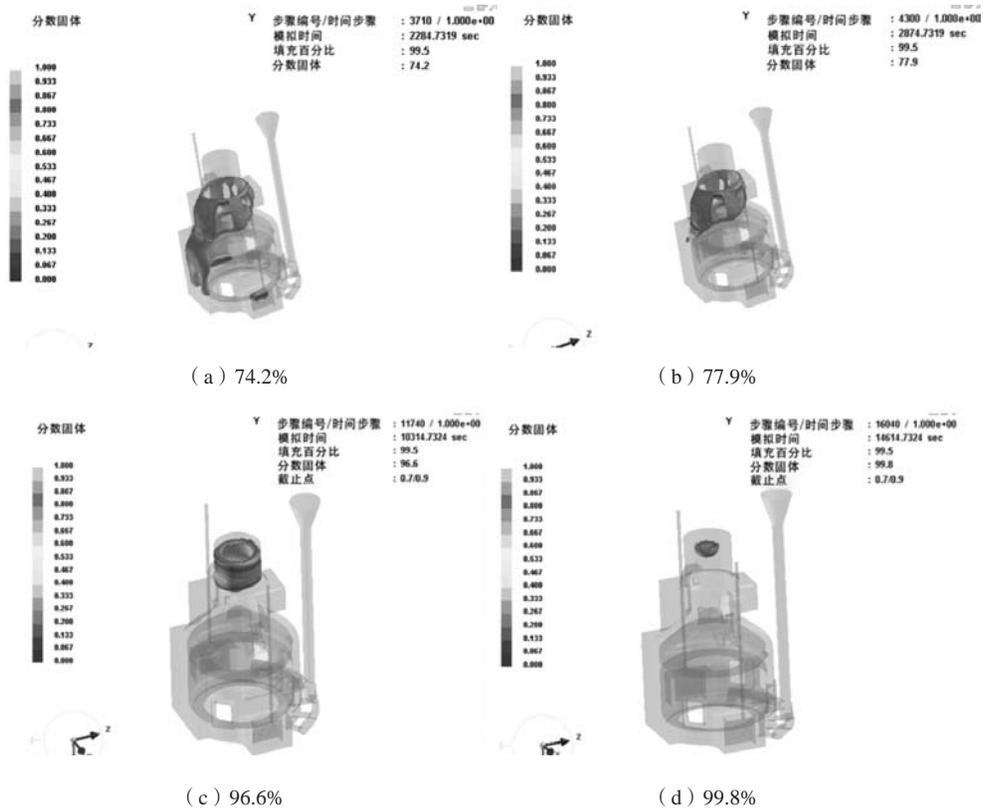


图11 固相率分析

Fig. 11 Analysis results of the solid phase rate

出现了孤立的液相区；图11b铸件中部也出现了较小区域的孤立液相区。铸件从下部向上部逐步凝固，冒口最后凝固，此工艺设计符合顺序凝固原则；从图11c、d可以看出，发热冒口冷却最慢，而且计算时间长，所以只要铸件全部凝固，发热冒口无需计算完成，也不影响模拟结果的判定。

5.2.3 缺陷分析

为了充分解决当前浇注系统存在的铸造缺陷方面的问题，保证铸件质量，对一次优化后的系统再次进

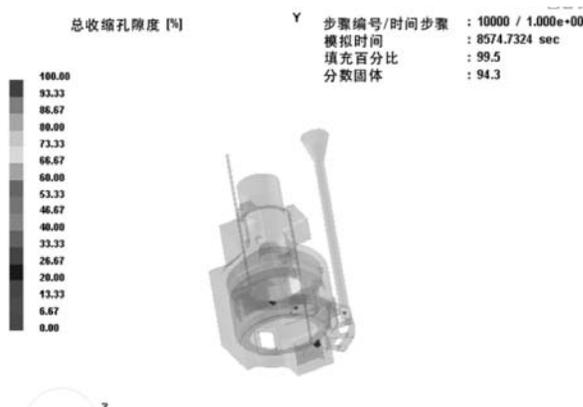


图12 缺陷分析

Fig. 12 Analysis of the defect

行模拟仿真缺陷分析，如图12所示，发现固相率分析出的三处孤立的液相区部位均出现了缩松缺陷，缺陷分布在铸件的三个位置，而铸件这三处壁厚较厚，分别形成了较小的热节，所以需要加快这三处的冷却速度，避免热量集中；另外考虑砂型整体热散，中间砂芯能更快排出热量。

5.2.4 二次优化措施

通过初次优化后的缺陷分析和产生的原因分析，为了最大程度降低缩松出现的可能性，进一步对铸造工艺作出如下改进：①在铸件三个缺陷位置处分别设置冷铁，从而加快三处的冷却速度，避免缩松缺陷；②在下型增加排气孔与1#大砂芯中空位置相连，使铸件内部热量能加快排出，铸件下部的冷却速度更快，从而使上部的冒口补缩效果更好。

6 冷铁的设计

6.1 冷铁的位置与形状选择

冷铁可消除铸件局部应力，拥有增加冒口补缩距离，防止裂纹的功能^[1]，结合提升箱体的结构特点与模拟分析结果，选择使用外冷铁，冷铁材质为高碳钢。根据模拟分析的三处孤立热节部位设置冷铁，冷铁设

置在铸件的外平面和内圆弧面两个位置。外平面上的冷铁是成型冷铁，内圆弧面上是异形冷铁。冷铁位置如图13所示。

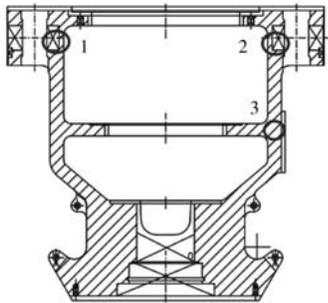


图13 需要增设冷铁的位置

Fig. 13 Locations of additional chills required

6.2 二次优化结果分析

为铸件模型增加冷铁，下部增加排气孔后进行第三次模拟分析验证如图14所示，仿真结果显示铸件内部已无可见的特征缺陷，说明设置冷铁和增加气孔以加强铸件内部散热的改进措施有效，二次优化后的铸造工艺符合预定要求。

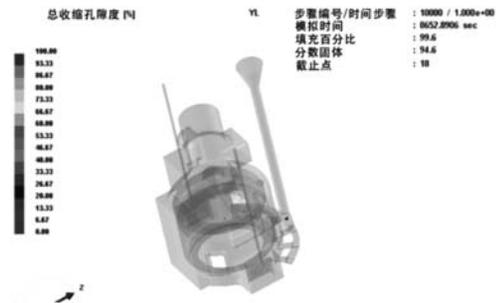


图14 缺陷分析

Fig. 14 Defect analysis

7 结论

(1) 根据铸件的结构与尺寸特征，为其设计了顶注式和底注式两种浇注系统。

(2) 依照ProCAST对比模拟分析铸造缺陷后选择底注式浇注系统，并先后两次分别为铸件增设发热冒口、外冷铁和排气孔以进行工艺优化。

(3) 对优化后的铸件进行数值模拟分析，固相率结果显示无明显铸造缺陷，铸件实现顺序凝固，此工艺提升了铸件的成形效率，保证了铸件质量。

参考文献:

- [1] 徐春杰. 砂型铸造工艺及工装与生产设计教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [2] 唐方艳, 梅益, 薛茂远, 等. 大型机床底座铸造工艺设计与优化 [J]. 铸造, 2022, 71 (1): 103-108.
- [3] 刘晨, 米国发, 王有超, 等. 横梁铸钢件砂型铸造数值模拟及工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (12): 1266-1269.
- [4] 熊火顺, 向尚林, 陈涛. 摇枕和侧架铸钢件夹砂及粘砂缺陷控制措施 [J]. 铸造, 2021, 70 (9): 1106-1109.
- [5] 郑宝堂. 砂型铸造铁路货车车钩铸钢钩体铸造工艺分析与验证 [J]. 铸造, 2021, 70 (5): 609-614.
- [6] 韩宝, 马彦伟, 李志杰, 等. 基于ProCAST的轮轴铸钢件砂型铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 253-258.
- [7] 田学雷, 刘长森. 基于三维的铸钢件模数计算 [J]. 中国铸造装备与技术, 1997 (3): 48-49.

Optimization Design and Defect Analysis of Casting Process for a Box

MA Cong, YANG Meng-xin, CHENG Qiang, CHU Hong-yan

(Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract:

Taking a certain lifting box as the object of casting process design, through the analysis of its structure and function, two kinds of pouring systems, top and bottom gating systems, were designed for it. After numerical simulation and comparative analysis of the two kinds of pouring systems using ProCAST simulation software, the bottom gating system was selected. Two process optimizations were carried out for the bottom pouring system, and hot and insulating risers, vents and chills were added successively. The simulation analysis confirmed that the optimization measures were effective, and the probability of the casting defects was greatly reduced.

Key words:

casting steel; sand casting process; ProCAST simulation; bottom gating system; optimization analysis