

基于数值模拟的铸钢凸圈消失模铸造工艺方案设计

李欣然¹, 苏彦庆¹, 王亮¹, 李平², 赵俊岩³

(1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 河南理工大学材料科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 3. 焦作神华重型机械制造有限公司, 河南焦作 454000)

摘要: 在铸钢凸圈开发初期, 针对其结构特点, 进行了消失模铸造工艺性分析, 设计出了两种工艺方案。利用华铸CAE软件对两种设计方案的充型和凝固过程进行了模拟, 筛选出了较优工艺方案。结果表明: 采用凸圈大断面朝上的工艺方案, 其充型过程平稳, 补缩效果好, 重要表面无明显缩松、缩孔缺陷, 且该方案泡沫模样粘结组装便利。通过实际生产验证, 铸件质量满足用户要求。

关键词: 铸钢凸圈; 消失模铸造; 数值模拟; 工艺设计

消失模铸造工艺是采用与铸件尺寸形状一致的泡沫模样及浇注系统粘结组合, 在砂箱中填入无粘结剂的干砂振动造型, 在负压下浇注, 使泡沫模样气化, 液态金属冷却凝固形成铸件的方法。该工艺具有铸件尺寸精度高、表面质量好, 落砂容易、旧砂回收率高, 飞边毛刺少、清理工作量小, 工艺出品率和生产效率高等优点, 被誉为二十一世纪的绿色铸造技术, 已成功应用于汽车、拖拉机、矿山、冶金等领域, 铸件材质可为铸铁、铸钢、铝合金、镁合金和钛合金等^[1-11]。

在铸件开发初期或铸造批量生产过程中, 利用数值模拟技术对充型与凝固过程进行可视化仿真, 预测铸造过程中可能出现气孔、缩松、缩孔等铸造缺陷的部位和大小, 从而预判铸造工艺方案的合理性。与传统“试错法”相比, 数值模拟技术能够缩短铸件新产品开发或生产改进周期, 降低铸造成本, 提高生产效率^[8, 12-15]。

本研究利用华铸CAE软件, 在铸钢凸圈开发初期, 对设计的两种工艺方案进行了充型与凝固过程数值模拟, 通过对模拟结果进行分析, 得出了可行的铸造工艺方案, 成功用于铸钢凸圈的实际生产, 为类似铸件的生产提供参考。

作者简介:

李欣然(1999-), 女, 硕士, 主要研究方向为铸造技术和3D打印。E-mail: ranxinlee68@163.com

通讯作者:

苏彦庆, 男, 教授, 博士生导师。电话: 13936502366, E-mail: suyq@hit.edu.cn

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)03-0305-05

收稿日期:

2022-04-29 收到初稿,
2022-06-23 收到修订稿。

1 零件结构分析

凸圈为某矿用机械设备上的一个零部件, 图1和图2所示为零件结构图和三维模型图。零件轮廓尺寸为 $\Phi 435$ mm \times 114 mm, 名义壁厚为25 mm, 凸圈上端面呈渐开线形状, 为重要表面, 此端不允许有缩孔、缩松、气孔、砂眼、冷隔、浇不足、裂纹、夹杂物等铸造缺陷; 下端为平面, 因在后期实际使用时凸圈内圈部分需与其他机构配合完成工作, 故需要保证位于凸圈内侧三处弧柱部分的位置度设计要求。左侧高度最小处为21 mm, 右侧高度最大处为114 mm, 两侧高度相差较大, 铸造生产控制难度较大。此凸圈为上外凸圈, 需要与下内凸圈配合使用来控制机构的运动。凸圈表面应保持较好的耐磨性, 使其在矿浆的持续冲刷下维持较长时间的使用寿命。材料为ZG50CrMnSiA, 铸件质量28 kg, 化学成分要求见表1。

2 铸造工艺及数值模拟参数

2.1 工艺方案设计

从图1可以看出, 本铸件的工艺方案设计难点在于: 如何在凸圈壁厚均匀但两

表1 凸圈铸件的化学成分
Table 1 Chemical composition of the convex ring casting

C	Si	Mn	S	P	Cr	$w_B / \%$
0.45~0.55	0.40~0.60	0.70~1.00	≤ 0.020	≤ 0.030	0.80~1.20	

侧高度不等的情况下能够保证重要端面的质量。为解决这个问题,首先就放置位置而言,应避免重要端面朝上,位于侧面或底面时质量易于保证,结合铸件结构特点和后续浇冒口放置等因素,采用铸件模样立式放置,使得重要端面位于侧面,两个凸圈通过中部两个拉筋联成一组模样簇。同时根据零件结构的工艺分析,初步拟定两种工艺方案,如图3所示。方案1凸圈铸件狭窄部位在上、厚大部位在下,可利用铸件重力作用对厚大部位进行补缩,且装箱填砂过程中操作较平稳,但狭窄部位在顶部,不利于粘结浇口杯模样;方案2厚大部位在上、狭窄部位在下,有利于粘结浇口杯模样,由于浇注后浇口杯中的金属液最后凝固,可对厚大部位进行有效补缩。

2.2 浇注系统设计

由于消失模铸造工艺与传统砂型铸造工艺有较大

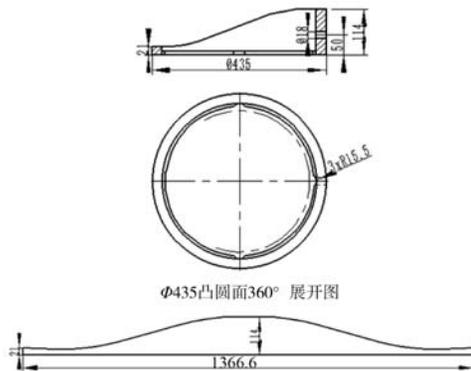


图1 凸圈结构图

Fig. 1 The structure drawing of the convex ring

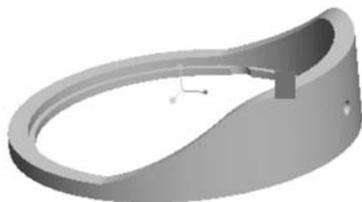


图2 凸圈三维模型

Fig. 2 3D diagram of the convex ring

表2 铸件及泡沫材料热物性参数

Table 2 Thermophysical parameters of the materials of the casting and foam

材料	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比热容/($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	潜热/($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	液相线温度/ $^{\circ}\text{C}$	固相线温度/ $^{\circ}\text{C}$	热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
凸圈(50CrMnSiA)	7.6	0.828	251.2	1 480	1 309 [*]	22.015
泡沫模样(EPS)	2.5	3.7	100	350	330	0.15

注:凸圈液相线温度和固相线温度通过经验公式计算得到,其余参数参照30CrMnSi钢^[15]。

差异,因此,在设计浇注系统时,不能完全参照砂型铸造的相关设计理论。在消失模铸造过程中,由于金属液流程的长度会影响到充型时模样的气化、热量损失和流动性等^[16],故在设计浇注系统时,其结构应相对简单,尽量减少浇注系统组元,以保证充型过程快且平稳。对于铸钢件,大多采用顶注或阶梯式浇注系统^[17-19],具体到凸圈中,若采用顶注式浇注系统,由于立式放置导致高度方向尺寸较大,金属液进入铸型后对铸件底部冲击较大,易出现飞溅和氧化现象;而阶梯式浇注系统能够实现分层充型,使得铸件拥有较为合理的凝固顺序,同时落砂、气孔、夹渣等能够上浮并尽可能集中在冒口处。故在此采用阶梯式浇注系统,并由此设计出两种方案,如图3所示。第1种方案浇口杯与小端面顶部相连接,直浇道底部侧面与大断面侧面相连;第2种方案所不同的是,浇口杯与大端面顶部相连接,直浇道底部侧面与小断面侧面相连,保持两种方案的直浇道面积和内浇口面积基本一样,为简化浇注系统结构,两种方案均未设置横浇道。

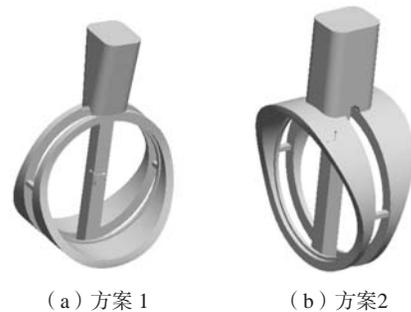


图3 两种浇注方案示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of two gating projects

2.3 数值模拟参数设置

凸圈材质为ZG50CrMnSiA,泡沫材质选用EPS,其热物性参数见表2和表3^[15, 20]。浇注温度为1 640 $^{\circ}\text{C}$,负压度为0.06 MPa,环境温度20 $^{\circ}\text{C}$,铸件-铸型的界面传热系数取为800 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,泡沫模样-铸型的界面传热系数取为100 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,铸型外表面与大气的传热系数取为10 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,浇注时间10 s。

3 数值模拟结果及分析

3.1 第一种方案

凸圈第一种方案的充型过程数值模拟结果如图4所

表3 初始物性参数
Table 3 The initial physical parameters

物质	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	热导率 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	比热容 $/(J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$	初始 温度/ $^{\circ}C$
铸型	1.55	0.804	1.088	20
空气	0.012 1	0.026 0	1.005	20

示,从图中可以看出,当 $t=1.66$ s时,金属液即将充满浇注系统,少量钢液先从顶部小断面进入“型腔”,而底部大断面还未充填金属液,如图4a所示,这是因为底部大断面泡沫模样还未被金属液气化的缘故;从图4b可见,当 $t=4.53$ s时,底部大断面泡沫模样在高温熔融金属液的作用下气化,一方面当金属液开始充填铸件的厚大部位时,充型速度明显放缓,这是因为泡沫模样与高温熔融金属液相遇,气态产物的排出速度小于气态产物的生成速度,故在充型端产生一定压力,阻碍金属液的充型;另一方面,由于泡沫燃烧气化的吸热作用,先充填型腔的金属液出现了明显的降温现象。当 $t=8.35$ s时,底部大断面基本充满,而顶部小断面尚未充满,如图4c所示。当 $t=9.61$ s时,整个铸件型腔已基本充满,只剩浇口杯未充满,如图4d所示。如图4e所示,当 $t=12.88$ s时,金属液充满整个型腔,充型呈现出底部大断面充填较快、顶部小断面充填较慢,整个充型过程平稳,无飞溅现象。

凸圈第一种方案的凝固过程温度场数值模拟结果如图5所示,从图中可以看出, $t=108.12$ s时,上部小断面即将完全凝固,底部大断面仅四周金属液开始凝

固;接着底部大断面金属液向内部逐渐凝固,此时直浇道和铸件底部连接处还未凝固,可以对大断面起到补缩作用,见图5b;当 $t=281.39$ s时,铸件型腔已基本凝固,只剩直浇道底部和浇口杯还未凝固,见图5c;当 $t=354.39$ s时,直浇道中间部分已完全凝固,因而浇口杯中的金属液不能流入底部,对铸件大断面位置起到补缩作用,仅仅依靠直浇道底部少量未凝固的孤立状金属液,不可能对铸件大断面起到充分的补缩作用(见图5d),大断面处极有可能产生缩孔或缩松缺陷,尽管模拟结果中大断面位置未发现明显的缩孔、缩松缺陷;当 $t=1\ 148.77$ s时,整个型腔全部凝固,可以看出,浇口杯和直浇道底部出现了缩孔,而凸圈铸件中没有看到缩孔缺陷,凸圈铸件可能出现缩松的位置主要分布在顶部小断面内部(图5e)。

3.2 第二种方案

凸圈第二种方案的充型过程数值模拟结果如图6所示,与图3中第一种方案相比,整个型腔的金属液充型时间相差不大,但充填顺序有所差异。从图中可以看出,当 $t=1.66$ s时,金属液即将充满浇注系统,少量钢液先从顶部大断面进入“型腔”,而底部小断面还未充填金属液,如图6a所示;从图6b可见,当 $t=3.52$ s时,底部小断面已首先充满金属液;当 $t=5.30$ s时,金属液从底部小断面向上流动充填凸圈中部,而顶部大断面尚未充满,如图6c所示;当 $t=8.14$ s时,整个铸件型腔已基本充满,只剩浇口杯未充满,如图6d所示;

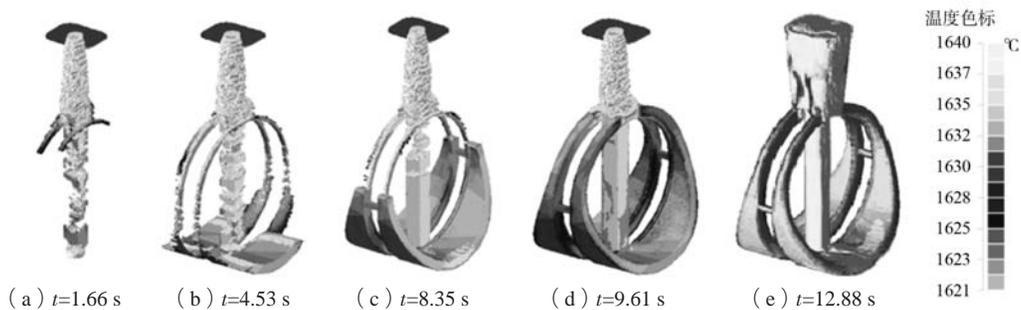


图4 方案1充型过程

Fig. 4 Simulation results of the filling process of the first project

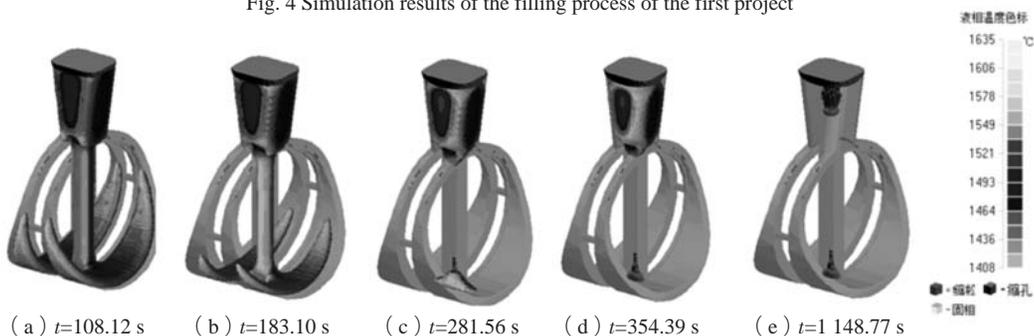


图5 方案1凝固过程

Fig. 5 Simulation results of the solidification process of the first project

如图6e所示,当 $t=12.06$ s时,金属液充满整个型腔。铸件充型整体呈现出底部小断面充填较快、顶部大断面充填较慢、最后充满的特点。与第一种方案相比,虽然金属液的充填顺序都是先铸件底部、后铸件顶部,但由于铸件放置方向的不同,充填的具体部位也不同。

凸圈第二种方案的凝固过程温度场数值模拟结果如图7所示。从图中可以看出,底部小断面首先凝固,直浇道和顶部大断面金属液还未开始凝固,可以对凸圈下半部分起到补缩作用;接着从底部小断面向上,即顶部大断面四周和底部直浇道四周的金属液开始凝固,见图7b;当 $t=289.58$ s时,除铸件型腔顶部与浇口杯以外,其余部位金属液已基本完成凝固,浇口杯仍可对铸件大断

面最后凝固部位进行有效补缩,见图7c;当 $t=389.33$ s时,除浇口杯心部还未凝固,铸件型腔已全部凝固,见图7d;如图7e所示,当 $t=1408.85$ s时,整个型腔全部凝固,凝固时间较第一种方案要长些。可以看出,凸圈铸件可能出现缩松的位置主要分布在底部小断面内部,仅浇口杯和直浇道底部可能出现缩孔,而凸圈铸件大断面最后凝固处由于浇口杯的补缩作用,缩孔缺陷可以得到消除,这是和图4第一种方案的显著差异。

从以上两种方案的模拟结果可以看出,第二种方案的浇口杯对铸件大断面的补缩效果较好,同时大断面与浇口杯相连,便于泡沫模样组合时粘结浇口杯,故选取第二种方案作为优化工艺方案用于凸圈消失模铸造的批量生产。

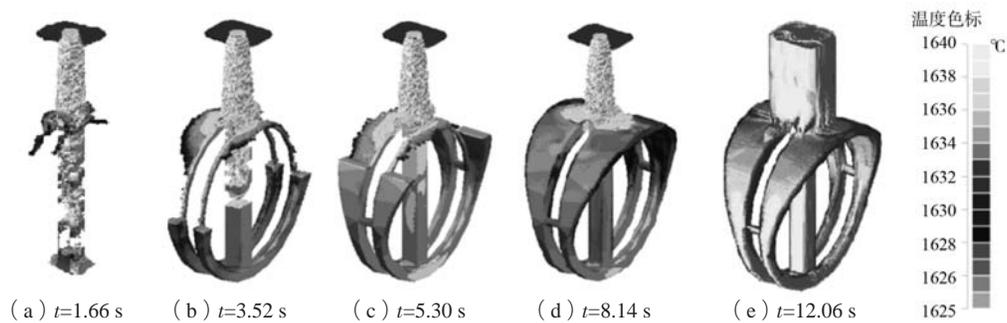


图6 方案2充型过程的数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of the filling process of the second project

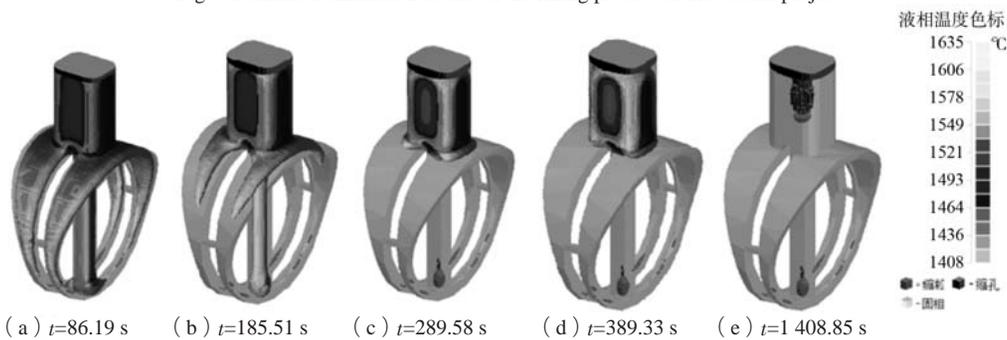


图7 方案2的凝固过程数值模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results of the solidification process of the optimized project

4 生产验证

按照工艺方案2进行了EPS模样制造和批量生产验证,生产的凸圈铸件经外观和解剖检验,铸件没有出现明显缩孔、缩松等缺陷,渐开线重要表面质量好,铸件经后续热处理后装机使用表明,凸圈性能满足客户要求,图8a为凸圈消失模模样,图8b为生产的合格铸件。

5 结束语

针对凸圈的结构特点,设计出了两种消失模铸造工艺方案,通过数值模拟对其充型和凝固过程进行了



(a) EPS模样 (b) 凸圈铸件

图8 EPS模样与合格的凸圈铸件

Fig. 8 EPS model and the qualified convex ring casting

比较分析, 选出一种较优的工艺方案。优化方案经实际生产验证, 铸件没有出现缩孔和明显缩松等铸造缺陷, 满足了用户的技术要求, 表明数值模拟技术对凸

圈消失模铸造工艺设计起到了很好的实际应用效果。

参考文献:

- [1] 王新节. 柴油机气缸体的消失模铸造工艺 [J]. 铸造, 2011, 60 (10): 962-966.
- [2] 轩世成, 韩建普, 蒋卫东, 等. 采用消失模工艺生产拖拉机牵引架铸钢件 [J]. 铸造, 2016, 65 (1): 104-106.
- [3] 张俊祥, 郭亚辉, 范随长, 等. 消失模铸造在大型箱体生产上的应用 [J]. 铸造, 2012, 61 (11): 1327-1330.
- [4] 刘瑞丽, 叶升平, 薛国祯, 等. E型磨煤机钢球消失模铸造工艺及数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32 (2): 161-164.
- [5] 王仲珏, 傅宏江, 刘冠岳. 中大型耐磨铸钢件的消失模铸造 [J]. 铸造, 2012, 61 (9): 1019-1021.
- [6] 尚润琪, 屈银虎, 成小乐. 消失模铸造销轨的断裂失效分析及预防 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (10): 1083-1085.
- [7] 李健, 朱淑兰. 烧结机尾固定筛篦条的消失模铸造 [J]. 铸造, 2007, 56 (4): 372-374.
- [8] 邓超, 龙骏, 郑志斌, 等. 基于ProCAST的履带板消失模铸造凝固过程数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (3): 368-374.
- [9] 高成勋, 刘伟明, 颜鹏远. 铝合金缸体、缸盖的消失模铸造 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30 (8): 768-371.
- [10] 江再良, 樊自田, 蒋文明, 等. 消失模铸造液-液复合Al/Mg双合金界面特征研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (6): 632-636.
- [11] 史昆, 鲁玲玲, 赵军, 等. 复杂曲面钛合金叶轮消失模铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2019, 68 (4): 344-346.
- [12] 凌云飞, 杨军, 刘胜田. 数值模拟技术在摇枕铸造工艺设计中的应用 [J]. 铸造, 2011, 60 (6): 565-570.
- [13] 赵杰, 陈荣发, 黄志刚, 等. 数值模拟在镁合金钉枪枪体压铸工艺优化中的应用 [J]. 铸造, 2015, 64 (8): 758-761.
- [14] 张雷雷, 李锋军, 蔡安克, 等. 消失模铸造充型过程模拟仿真的虚拟现实可视化应用 [J]. 铸造, 2015, 64 (6): 550-554.
- [15] 李平, 刘松涛, 李锋军. CAE分析在煤矿掘进机用履带板开发中的应用 [J]. 铸造, 2016, 65 (3): 248-252.
- [16] 范家建, 李杨. 消失模铸造浇注系统的设计原则 [J]. 现代铸铁, 2018, 38 (2): 71-75.
- [17] 朱丽娟, 周源, 王明娜, 等. 消失模负压铸造浇注系统设计的探讨 [J]. 铸造技术, 2009, 30 (7): 942-944.
- [18] 李增民, 李志勇. 消失模铸造的关键技术 [J]. 铸造技术, 2002, 23 (3): 155-159.
- [19] 陈建华, 胡磊, 李冰. 顶注浇注系统在消失模筒形铸件中的应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (1): 81-83.
- [20] 张国强, 赵占西, 顾君捷, 等. 缸体消失模铸造数值模拟与工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (1): 63-66.

Design of Lost Foam Casting Process for Cast Steel Convex Ring Based on Numerical Simulation

LI Xin-ran¹, SU Yan-qing¹, WANG Liang¹, LI Ping², ZHAO Jun-yan³

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China; 3. Jiaozuo Shenhua Heavy Machinery Manufacturing Co., Ltd., Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract:

At the initial stage of cast steel convex ring's development, according to its structural characteristics, the lost foam casting process analysis was carried out, and two process schemes were designed. InteCAST software was applied to simulate filling and solidification processes of two projects, respectively. The better design project was selected out. The results showed that for the process scheme of convex ring with large section upward, the filling process was smooth, the feeding effect was better, and there were no obvious shrinkage defects on the important surface. Moreover, the foam pattern was easy to be bonded and assembled. Through the actual production verification, the casting quality met the user's requirements.

Key words:

cast steel convex ring; lost foam casting; numerical simulation; process design