

# 铸钢砧座铸造工艺设计及优化

赵红乐<sup>1</sup>, 范文学<sup>2</sup>, 寇海军<sup>3</sup>, 郝海<sup>2</sup>, 陈献刚<sup>4</sup>, 陈彬<sup>5</sup>, 杨小冬<sup>6</sup>, 胡兵<sup>7</sup>

(1. 晋西车轴股份有限公司, 晋西装备制造有限责任公司, 山西太原 030024; 2. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁大连 116024; 3. 北方自动控制技术研究所, 山西太原 030006; 4. 内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古包头 014033; 5. 江南工业集团有限公司, 湖南湘潭 411100; 6. 江麓机电集团有限公司, 湖南湘潭 411100; 7. 中国兵器工业试验测试研究院, 陕西华阴 714200)

**摘要:** 针对单件ZG45砧座铸件产品, 借助ProCAST软件进行砂型铸造工艺辅助设计和优化, 利用UG三维模样设计、聚苯乙烯泡沫(以下简称泡沫)以及泡沫切割机制作分体模样并组装, 实现了酯硬化水玻璃砂型快速制备。采用优化工艺试制铸件, 获得质量合格砧座产品。与采用木模方法对比, 研制进度提高30%。

**关键词:** ZG45; 砧座; 砂型铸造; 数值模拟; 裂纹缺陷

砧座是锻锤重要支撑部件, 其工作过程会频繁受到重载冲击, 工作条件较差, 因此对其质量要求严格。砧座结构简单, 在制作过程必须避免缩孔、裂纹缺陷的产生, 降低缩松聚集, 减少砂眼、夹杂缺陷<sup>[1-2]</sup>。铸件产品生产一般需经过工艺设计、模具制作、产品试制等过程, 最终才能完成产品开发及交付。当前, 利用数值模拟技术对铸造工艺进行分析, 借助泡沫加工、3D打印技术等方法, 可快速进行模样、砂型的制作, 进而节约成本, 提高开发效率<sup>[3-7]</sup>。

砧座材质为ZG45, 结构简单, 且为单件生产, 决定采用泡沫制作模样, 并借助数值模拟技术分析铸件充型凝固过程<sup>[8-10]</sup>, 优化铸造工艺, 确保产品质量。

## 1 砧座结构特点、技术要求

### 1.1 砧座结构特点

砧座为板类结构, 由三部分拼接为整体, 包括外部燕尾结构和内部燕尾结构。砧座产品轮廓尺寸1 000 mm × 720 mm × 300 mm, 重约1.3 t。结构如图1所示。

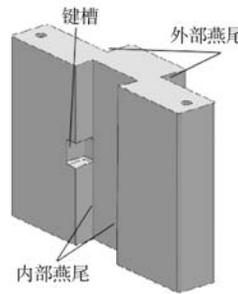


图1 砧座零件三维实体图

Fig. 1 Three-dimensional solid diagram of anvil base parts

### 1.2 砧座技术要求

铸件材质为ZG45, 化学成分要求如表1所示。

表1 铸件化学成分要求

Table 1 Chemical composition requirements of casting

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ni
0.42~0.50	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	0~0.25	0~0.25	0~0.30

铸件关键位置为内燕尾、外燕尾、键槽, 这些部位不允许有缩孔、缩松、气孔、夹砂、夹渣、裂纹等铸造缺陷。铸件需调质处理, 处理后本体硬度为HB205~240。

作者简介:

赵红乐(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为铸造工艺设计及热处理。电话: 18803418012, E-mail: zhaohongle1985@126.com

中图分类号: TG26

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2023)10-1357-06

收稿日期:

2022-07-05 收到初稿,

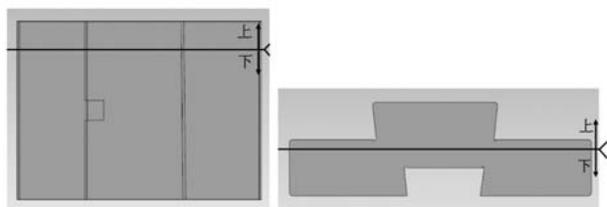
2023-05-08 收到修订稿。

## 2 砧座铸造工艺设计

本次砧座为单件生产, 结合对图纸及技术要求的分析, 发现其结构相对简单, 并且毛坯所有面均需机械加工处理。针对以上特点优先选择利用泡沫进行模样的制作, 省去模具的制作环节, 可以提高产品的开发效率, 降低生产成本。

### 2.1 分型面选择

采用泡沫制样、酯硬化水玻璃砂造型工艺制作铸型, 与消失模铸造方法相比, 因为没有负压, 砂型依靠粘结剂硬化, 其透气性较低。在合箱前必须将泡沫模样从砂型中去除, 否则泡沫模样会在浇注过程中分解产生大量气体, 导致浇注速度缓慢, 甚至气体会从浇道溢出, 形成反喷, 最终导致产品报废。在进行工艺设计时, 考虑砂型硬化后的泡沫模样的取出, 尽量选取大的截面位置进行分型、分模。根据砧座的结构特点, 可以选择水平和垂直两种分型方案, 如图2所示。垂直分型时, 金属液可以由下向上逐层填充, 充型过程较平稳, 铸件收缩变形量也较小, 可以在上部放置一个或两个冒口进行补缩。水平分型时, 铸件浇注过程大平面向上, 易在上平面产生砂眼、气孔。考虑铸件补缩的需要, 需在上平面放置冒口, 根据铸件结构及壁厚, 需放置三个冒口, 这样工艺出品率较低。并且采用水平分型中间放置冒口的方案, 铸件变形量较大。综合以上分析, 最终选择垂直分型方案。



(a) 垂直分型方案 (b) 水平分型方案

图2 分型面方案

Fig. 2 Parting surface schemes

### 2.2 加工余量

砧座毛坯产品外表面均要求进行机械加工。首先内部燕尾槽中间键槽和外部燕尾中间键槽均不铸出, 成品采用机加方法实现; 其次内部燕尾槽和外部燕尾均铸成非燕尾结构; 参考GB/T 6414—1999, 选取机械加工余量等级为H级, 加工余量为8 mm; 造型后泡沫模样去除过程很容易破坏铸型表面, 浇注过程易使铸件产生砂眼, 砂眼易于在铸件上表面聚集, 同时铸件上表面也是气孔聚集区域, 因此将上表面加工余量设定为18 mm。

### 2.3 冒口设计

砧座长宽比小于5, 整体可按杆类处理, 其模数为62 mm, 可通过选取模数大于75.4 mm的发热冒口来进行铸件凝固过程金属液的补充。利用企业现有冒口, 选择FT400-S350型发热保温冒口, 其参考模数83.1 mm。

### 2.4 浇注位置的选择和浇注系统设计

垂直分型时, 铸件总高较大, 易采用阶梯式浇注系统来使充型过程平稳, 同时阶梯型浇注系统还能保证铸件上部金属液温度较高, 有利于铸件形成良好的温度场, 利于铸件补缩顺利进行。

### 2.5 补贴和冷铁设计

利用UG进行产品的三维建模, 运用ProCAST铸造模拟软件对铸件充型凝固过程进行耦合分析。材质设定为ZG45, 成分取化学成分范围的中间值, 利用ProCAST软件自带功能进行材质物性参数计算。铸型设置为砂型, 浇注温度设定为1 565 °C, 砂型初温设定为20 °C, 浇注速度35 kg/s。其凝固过程温度场分布如图3所示, 缩孔、缩松如图4所示。砧座凝固过程在冒口正下方形成了很大体积的孤立液相区, 铸件凝固后在该区域会产生明显的缩孔、缩松缺陷。这说明冒口在垂直方向的补缩距离不足。增加冒口的补缩距离可以通过在冒口侧设置补贴来延长冒口区长度或者在冒

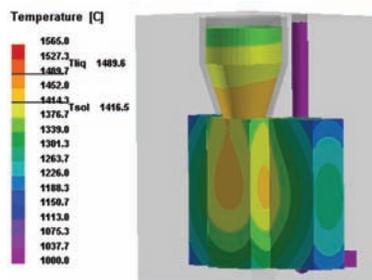


图3 温度场分布

Fig. 3 Temperature field distribution

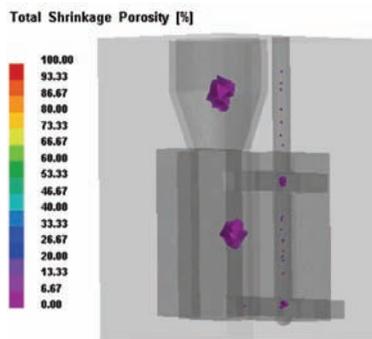
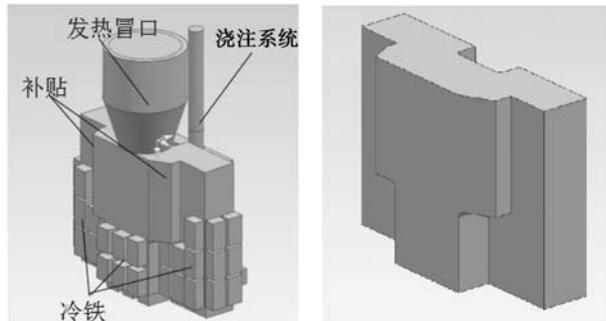


图4 缩孔、缩松分布

Fig. 4 Shrinkage cavity and shrinkage porosity distribution

口远端放置冷铁来增加末端区长度。本研究采取了同时设置补贴和放置冷铁的方式。铸件的初始铸造工艺及铸件毛坯如图5所示。



(a) 初始铸造工艺 (b) 铸件毛坯

图5 初始铸造工艺及铸件毛坯

Fig. 5 Initial casting process and casting blank

## 2.6 初始铸造工艺可行性分析

利用ProCAST软件对优化后的铸造工艺进行模拟。热物性参数、边界条件与2.5中设置相同。

### 2.6.1 充型过程

图6所示为砧座铸件充型过程数值模拟结果。砧座首先通过下层两个内浇道充入型腔，随着浇注的进行，当液面高度升高到和上层内浇道高度平齐时，金

属液从上层内浇道充入型腔。充型过程中在放置冷铁部位金属液温度有明显的降低。

### 2.6.2 凝固过程

图7为砧座铸件凝固过程温度场分布情况。凝固首先发生在放置冷铁的部位，逐渐从底平面向冒口方向凝固，最后凝固部分在冒口位置。凝固过程未发现孤立液相区，铸件形成了有利于减少缺陷的温度场分布。铸造凝固后的缩孔、缩松分布情况如图8所示，缺陷集中于浇道和冒口中，铸件部分未见缺陷，凝固模拟效果良好，铸造工艺可行。

## 3 铸件试制

### 3.1 泡沫模样制作

按初始工艺对模样进行分块设计，方便泡沫模样制作与组装。各部分切割好后利用胶棒进行粘结，按图纸要求进行组装。

### 3.2 造型

采用水玻璃砂进行造型。将组装好的泡沫模样放置在底板上，在模样上表面放置冷铁，套上砂箱，向砂箱内填入型砂，造型过程中按优化工艺适时放置侧面冷铁。待型砂没过泡沫模样后，人工辅助紧实砂型。砂型硬化后，将泡沫模样破坏并取出，而后检查

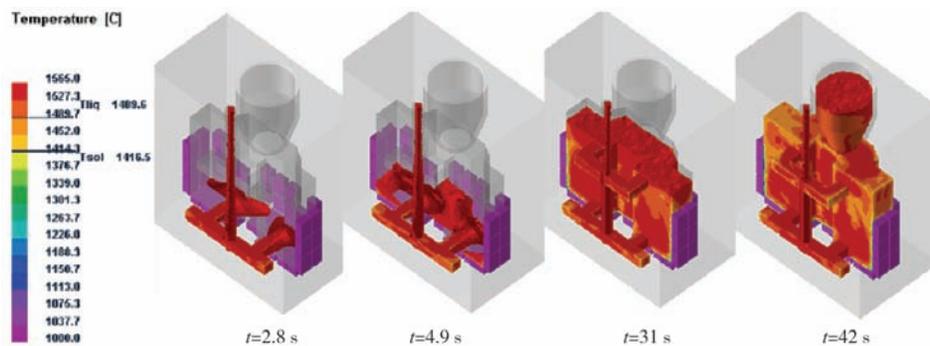


图6 初始工艺充型过程数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of initial process filling process

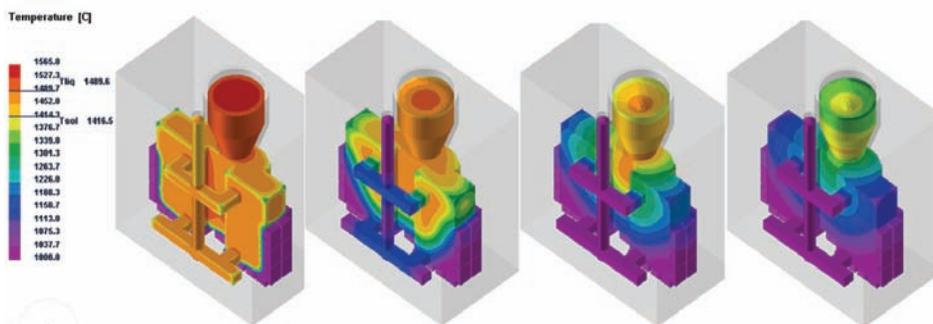


图7 初始工艺凝固过程数值模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results of initial process solidification process

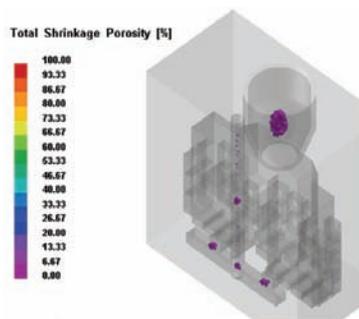


图8 初始工艺缩孔、缩松分布

Fig. 8 Shrinkage cavity and shrinkage porosity distribution in the initial process

砂型表面质量，并对破损部位进行修整。铸型表面涂刷醇基锆英粉涂料。

### 3.3 熔炼浇注

按照产品的成分要求进行配料、熔炼，炉前检测化学成分合格后进行浇注。在浇注过程中当液面上升至冒口高度1/3处时，改由冒口浇注，并间隔3~5 s点浇

2~3次。在冒口内放入发热覆盖剂，以延缓冒口凝固，促进补缩过程。

### 3.4 产品后处理

铸件后处理流程如图9所示。

砧座铸件清砂后发现铸件部分圆弧位置有较严重的粘砂，如图10所示。退火后的磁粉探伤未发现明显的裂纹缺陷，但是经过淬火后在内浇道处发现线状缺

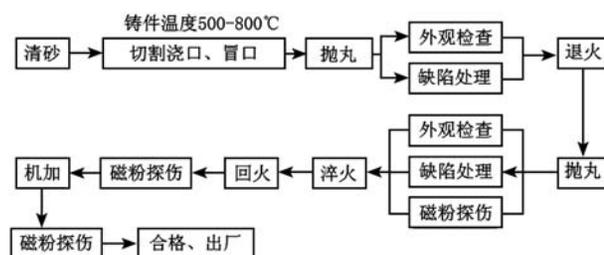
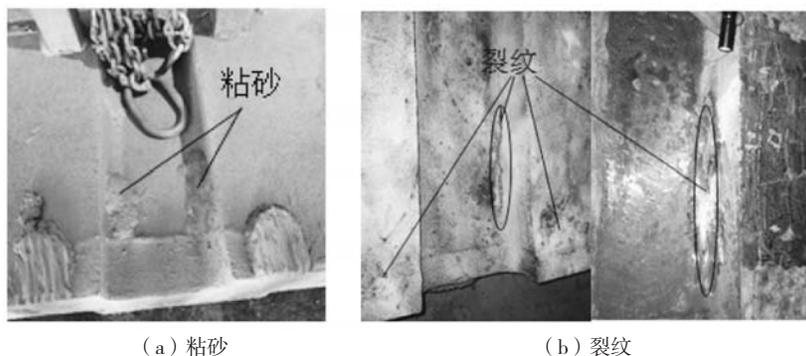


图9 铸件后处理流程

Fig. 9 Post-processing flow of casting



(a) 粘砂

(b) 裂纹

图10 初始工艺的铸件缺陷

Fig. 10 Casting defects in the initial process

陷；另外在内腔一侧圆弧位置发现一条较长的线状缺陷，去除表面金属后进一步观察发现裂纹较深，清理20 mm深度后仍不能完全去除，并且在缺陷去除过程还发现该部位有较小的孔洞类缺陷。产品最后只能作报废处理。

分析其原因，铸件内浇道处裂纹缺陷，是由于内浇道切割后的残余金属采用气刨方式去除，气刨会使周围产生高温区域，而后在冷却过程产生较大的应力，最终导致裂纹的发生。内腔圆弧处裂纹产生的原因，首先是该部位存在气孔、缩孔类孔洞缺陷，说明铸件补缩不充分；其次在淬火过程，产生了较大的应力，应力集中作用于孔洞周围，产生裂纹并沿缺陷带扩展。

通过对铸件生产过程跟踪及照片资料分析，有两个较明显的原因可能导致收缩应力的产生。第一，铸造工艺设计了较多的冷铁，侧面冷铁最多放置了三层，由于采用的是泡沫模样造型，侧面冷铁只能在造

型过程中一边填砂一边放置。实际放置的冷铁与工艺设计有所出入。第二，中间冒口位置偏向了一侧，导致另一侧补缩通道提前封闭。

试验重新对实际的生产工艺进行了凝固数值模拟，其方案如图11所示。凝固过程模拟结果如图12所示。从图中可以看出凝固过程在铸件上部形成了收缩缺陷。

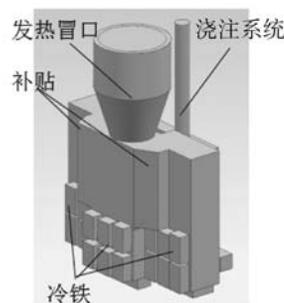


图11 实际生产时的铸造工艺

Fig. 11 Casting process in actual production

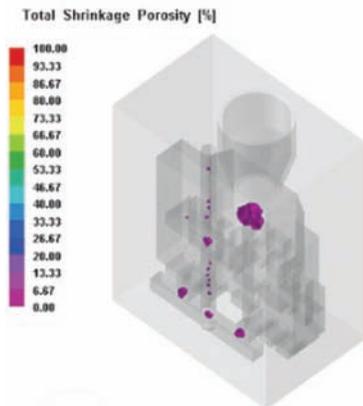


图12 实际工艺的缩孔、缩松分布

Fig. 12 Shrinkage cavity and shrinkage porosity distribution in actual process

## 4 铸造工艺优化

### 4.1 工艺优化方案

对于圆弧部位的粘砂缺陷，一方面在模样制作时增大圆弧的半径；另一方面在造型过程，通过加强人工辅助紧实的方法，增加圆弧部位型砂的紧实度，同时增加该部位涂料层的涂刷厚度。

对于内浇道处缺陷，在去除内浇道残余时，留有10~15 mm残余高度，剩余部分留到机加过程去除。

关于内侧圆弧收缩缺陷，考虑到现场操作因素，对工艺进行了重新设计，将冒口由中部一个增加为对

称的两个；去掉冒口补贴，减少机械加工工作量；调整冷铁位置，并在造型时注意冷铁放置位置，确保符合工艺设计的要求。改进方案的工艺出品率为61.8%。优化后的工艺方案如图13所示。

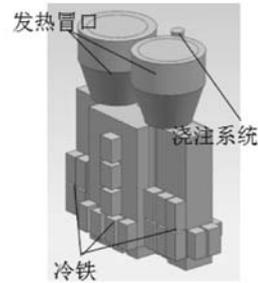


图13 优化后的铸造工艺

Fig. 13 Optimized casting process

### 4.2 优化工艺凝固模拟

利用ProCAST软件对优化后的工艺进行模拟，参数设置与之前一致。图14为铸件凝固过程温度场分布情况。铸件在底部和侧面放置冷铁的位置温度下降最快，率先发生凝固，铸件整体实现了由下向上的顺序凝固。铸件两个冒口的中间位置对称放置了两排冷铁，使得铸件形成了两个独立的热节，随着凝固的进行，最后的凝固发生于两个冒口中，铸件部分未产生孤立的液相区域。图15为铸件凝固后的缩孔、缩松分

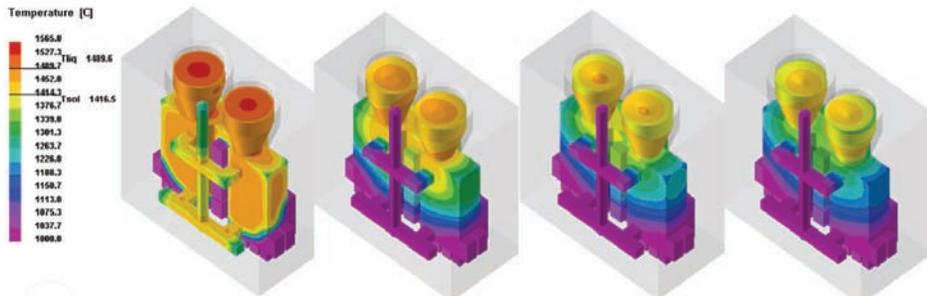


图14 优化工艺凝固过程的数值模拟结果

Fig. 14 Numerical simulation results of the solidification process for the optimization process

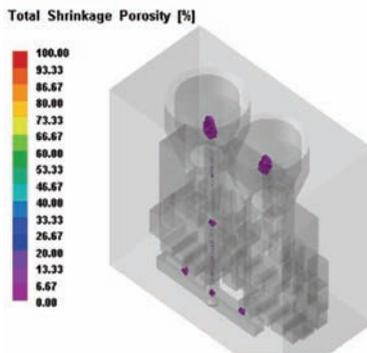


图15 优化工艺的缩孔、缩松分布

Fig. 15 Shrinkage cavity and shrinkage porosity distribution of the optimize process

布，由图可知，缺陷集中于浇注系统和冒口部分，铸件部分未发现缺陷。从数值模拟的结果上看，优化后的铸造工艺取得了良好的效果。

## 5 生产验证

按照改进后的工艺方案进行了生产，铸件经过清理、热处理、无损检测、机加、尺寸检查均满足要求。产品如图16所示，左侧部分为产品毛坯，右侧为机加后的成品。

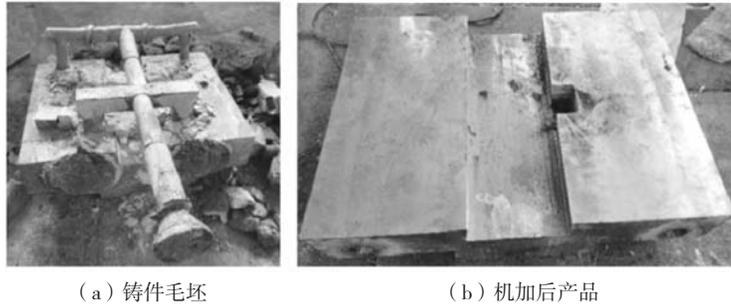


图16 产品实物  
Fig. 16 Product

## 6 结束语

(1) 采用数值模拟技术辅助铸造工艺设计及优化, 采用UG三维实体造型、聚苯乙烯泡沫和泡沫切割机制作模样, 实现了酯硬化水玻璃砂型快速制备, 熔铸成形优质ZG45砧座铸件, 提升产品研制进度30%。

(2) 在初始工艺设计时, 侧面设置了三层冷铁, 实际造型过程因操作不便, 导致产品产生了明显的收缩缺陷, 最终只能报废处理。在工艺优化时, 充分考虑了操作的可执行性, 增加冒口数量, 降低操作难度, 经试制产品符合了技术要求。

### 参考文献:

- [1] 贾秀梅, 孟慧洲, 张德刚, 等. 48t砧座铸造工艺的研究与应用 [J]. 金属加工, 2014 (13): 20-22.
- [2] 孙德润, 唐贤其, 宁德林, 等. 特厚大砧座铸件的铸造技术研究 [J]. 大型铸锻件, 2014 (3): 48-50.
- [3] 聂雄, 陈桂芳, 李赛白. 某型高强度液压马达壳体铸件快速开发 [J]. 铸造, 2021, 70 (7): 861-865.
- [4] 倪允强, 王佳, 陈秀明, 等. 基于砂型3D打印技术的气缸体快速铸造工艺开发 [J]. 铸造, 2019, 68 (8): 911-915.
- [5] 谭东, 夏少华, 史耀君, 等. 基于3D打印技术的车钩快速铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (6): 475-478.
- [6] 傅骏, 蔺虹宾, 周棣华, 等. 基于3D打印的艺术品模具快速熔模铸造实践 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (13): 99-100.
- [7] 朱雪明, 童幸生, 王凤华. 基于DLP-3D打印的闭式叶轮熔模快速铸造技术研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (11): 1370-1374.
- [8] 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.
- [9] 黄朋朋, 芦刚, 严青松, 等. 基于ProCAST的汽车制动鼓消失模铸造工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (8): 889-892.
- [10] 刘继飞, 李福军, 李涛, 等. 基于ProCAST的Cr-Ni-Mo低合金钢大转轴铸件工艺设计及优化 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (5): 63-67.

## Casting Process Design and Optimization of Steel Anvil Base

ZHAO Hong-le<sup>1</sup>, FAN Wen-xue<sup>2</sup>, KOU Hai-jun<sup>3</sup>, HAO Hai<sup>2</sup>, CHEN Xian-gang<sup>4</sup>, CHEN Bin<sup>5</sup>, YANG Xiao-dong<sup>6</sup>, HU Bing<sup>7</sup>

(1. Jinxi Equipment Manufacturing Co., Ltd., Jinxi Equipment Manufacturing Co., Ltd., Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian116024, Liaoning, China; 3. North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 4. Norinco Group Inner Mongolia North Heavy Industries Group Co., Ltd., Baotou 014033, Inner Mongolia, China; 5. Jiangnan Industries Group Co., Ltd., Xiangtan 411100, Hunan, China; 6. Jianglu Machinery & Electronics Group Co., Ltd., Xiangtan 411100, Hunan, China; 7. Test and Measuring Academy of China Ordnance Industries, Huayin 714200, Shanxi, China)

### Abstract:

For a single ZG45 anvil base casting product, the sand casting process aided design and optimization were carried out with the help of ProCAST software, and the UG three-dimensional pattern design, polystyrene foam (hereinafter referred to as foam) and foam cutting machine were used to make and assemble the pattern, and then hardened water glass sand molds were made quickly. The optimized process is used to trial-produce castings, and the qualified anvil base product is obtained. Compared with the wood mold method, the development progress is increased by 30%.

### Key words:

ZG45; anvil base; sand casting; numerical simulation; crack defects