

# 液压吊卡主体构件铸造工艺设计与数值模拟

秦伟<sup>1</sup>, 王圣波<sup>2</sup>, 宋伟<sup>3</sup>

(1. 海南科技职业大学, 海南海口 571126; 2. 海南职业技术学院, 海南海口 570216;  
3. 宝鸡石油机械有限责任公司 热工分公司, 陕西宝鸡 721000)

**摘要:** 液压吊卡主体是石油钻采关键铸钢构件, 因结构复杂、壁厚差大, 铸造易产生缩孔缩松、热裂等缺陷, 传统工艺设计试制周期长、废品率高。以ZG26CrNiMo材质液压吊卡主体为研究对象, 采用重力砂型铸造工艺, 开展浇注系统与冒口的设计计算, 确定开放式浇注系统参数及腰圆发热保温冒口规格。基于UG建立三维模型, 导入ProCAST软件开展凝固过程温度场、应力场数值模拟, 对比原工艺与改进工艺的铸造缺陷及应力变形情况。结果表明, 原工艺存在缩孔缩松、直角处应力集中(最大1 000 MPa)及大变形问题; 通过去除补缩系统、增设外冷铁与拉筋、将直角过渡改为R50 mm圆角, 消除了缩孔缩松, 铸件三向位移降至1 mm左右, 最大应力仅158 MPa。生产验证显示, 优化后铸件经无损检测无内部缺陷, 2倍计算载荷拉力试验无断裂, 满足API Spec 8C (2012)的PSL1级要求。该传统工艺与数值模拟结合的方法, 有效解决了关键铸造缺陷, 可为同类复杂铸钢件工艺设计提供参考。

**关键词:** 液压吊卡主体; 铸钢件; 铸造工艺设计; ProCAST; 数值模拟; 温度场; 应力场; 铸造缺陷; ZG26CrNiMo

**中图分类号:** TG242; TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 05-0554-07

**DOI:** 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0074

## Casting Process Design and Numerical Simulation of Hydraulic Elevator Main Component

QIN Wei<sup>1</sup>, WANG Sheng-bo<sup>2</sup>, SONG Wei<sup>3</sup>

(1. Hainan Vocational University of Science and Technology, Haikou 571126, Hainan, China; 2. Hainan Vocational University, Haikou 570216, Hainan, China; 3. Thermal Industry Branch of Baoji Oilfield Machinery Co., Ltd., Baoji 721000, Shaanxi, China)

**Abstract:** The main body of the hydraulic elevating catcher is a key cast steel component for oil drilling and production; due to its complex structure and large variations in wall thickness, it is prone to casting defects such as shrinkage cavities, shrinkage porosity and hot tearing, and the traditional process design results in a long trial cycle and a high rejection rate. In this research, taking the ZG26CrNiMo hydraulic elevating catcher main body as the research object and adopting the gravity sand casting process, the gating system and riser structure were designed; the parameters of the unpressurized gating system and the specifications of oval exothermic risers were determined, and a three-dimensional model was established via UG software and imported into ProCAST to conduct numerical simulations on the temperature and stress fields during solidification, with comparisons made regarding the casting defects, stress distribution and deformation generated by the original and improved processes. The results show that the original process causes obvious shrinkage cavities and porosity, severe stress concentration with a maximum stress of 1 000 MPa at right-angle positions and large deformation, whereas the improved process eliminates shrinkage cavities and porosity by removing the original feeding system, adding external chills and tie ribs, and adopting R50 mm fillet transitions instead of right angles, reduces the three-directional displacement of the casting to approximately 1 mm, and lowers the maximum stress to only 158 MPa. Production verification indicates that the optimized castings have no internal defects detected by non-destructive testing and show no fracture in tensile tests under twice the calculated load, which fully meets the PSL 1 requirements of API Spec 8C (2012); the combined application of traditional process experience and

**基金项目:** 海南省教育厅项目资助 (Hnjg2025-186)。

**收稿日期:** 2026-02-12 收到初稿, 2026-03-05 收到修订稿。

**作者简介:** 秦伟 (1986-), 男, 讲师, 硕士, 从事机械设计、NVH 技术研究工作。电话: 13637661068, E-mail: qinwei0405@126.com

**通信作者:** 王圣波, 男, 副教授、高级工程师, 硕士。电话: 15109828170, E-mail: 345153915@qq.com

**引用格式:** 秦伟, 王圣波, 宋伟. 液压吊卡主体构件铸造工艺设计与数值模拟 [J]. 铸造, 2026, 75 (5): 554-560.

QIN Wei, WANG Shengbo, SONG Wei. Casting process design and numerical simulation of hydraulic elevator main component [J]. Foundry, 2026, 75 (5): 554-560.

numerical simulation effectively solves critical casting quality problems and provides a reliable reference for the process design of similar complex cast steel parts.

**Key words:** main body of elevator; cast steel part; casting process design; ProCAST; numerical simulation; temperature field; stress field; casting defect; ZG26CrNiMo

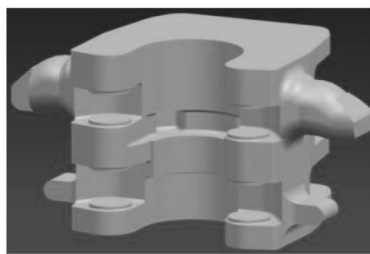
随着陆地石油勘探进入中后期、海洋石油勘探力度不断加大,对井口工具提出了更高的要求。液压吊卡作为石油钻采关键设备,在当前石油勘探及海洋深井开发中发挥着重要作用。以往的手动吊卡存在工作效率低、劳动强度大、易发生安全事故等问题,而液压吊卡的使用,既可以提高作业效率与速度,又能减轻工人劳动强度,提升作业安全性,具有较强的实用性和广阔的推广应用前景<sup>[1-5]</sup>。因此,液压吊卡在自动化钻井中是必不可少的。

主体作为液压吊卡的核心构件,其铸造结构复杂,容易产生缩孔、缩松和热裂等铸造缺陷。液压吊卡主体截面尺寸变化大,属于钢液难以补缩的铸钢件,同时探伤等级要求高,因此主体铸造难度较大。若采用传统“理论+经验+试验”式设计方法,试制周期长、废品率高,生产成本显著升高,严重影响生产效益。因此,本文通过“传统理论+经验+CAE”的模

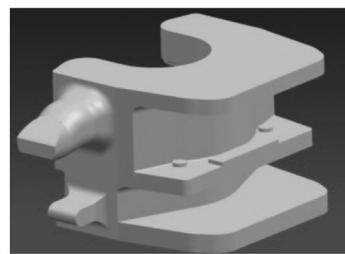
式,对液压吊卡主体铸件凝固过程进行温度场和应力场的数值模拟,优化工艺参数及工艺结构,达到提高其铸造质量的目的。

## 1 铸件产品分析

液压吊卡主体外形尺寸为1 070 mm × 550 mm × 490 mm,铸件毛坯重量760 kg,如图1所示。主体内部结构复杂,壁厚不均匀,最薄处为40 mm,最厚处超过200 mm。成品须经拉力试验,要求在两倍计算载荷下进行拉力试验无断裂现象,属高强度承载件,其材料为低合金高强度钢ZG26CrNiMo,化学成分如表1所示。主体铸件要进行表面无损检测(磁粉探伤)、体积无损检测(超声波探伤),其质量最终需满足API Spec 8C(2012)中的规定,并达到PSL1级质量验收要求。



(a) 主体主视图



(b) 主体侧视图

图1 主体三维立体图

Fig. 1 3D solid model of the main casting

表1 ZG26CrNiMo材料化学成分  
Tab. 1 Chemical composition of ZG26CrNiMo material

| C         | Si    | Mn        | P      | S      | Cr        | Mo        | Ni        | V     | Cu    | $w_B/\%$ |
|-----------|-------|-----------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|----------|
| 0.23~0.28 | ≤0.80 | 0.60~0.90 | ≤0.030 | ≤0.025 | 0.40~0.80 | 0.15~0.30 | 0.40~0.80 | ≤0.03 | ≤0.30 |          |

## 2 铸件工艺设计

主体铸造工艺采用重力砂型铸造方法,砂型及砂芯均选用碱酚醛树脂砂制作。浇注系统(包括直浇道、横浇道和内浇道)采用耐高温陶瓷管,冒口则选用发热保温复合材料制成。主体钢液采用电弧炉初炼与LF炉外精炼相结合的工艺进行熔炼。

### 2.1 浇注系统的计算

浇注系统除对液态金属在其中的流动状态有直接

影响外,还对铸件在铸型中的凝固和冷却过程中的热状态产生影响<sup>[6-10]</sup>。钢液的浇注温度高,流动性差,易二次氧化,铸件容易出现粘砂、热裂等铸造缺陷。因此,要求快速、平稳地充型<sup>[11-15]</sup>。车间采用底注包浇注,所以采用开放式浇注系统。

采用开放式浇注系统,各单元断面积的比例为:

$$\sum S_{内} > \sum S_{横} > \sum S_{直} > \sum S_{包} \quad (1)$$

式中:  $S_{内}$  为内浇道截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $S_{横}$  为横浇道截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $S_{直}$  为直浇道截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $S_{包}$  为包孔截面

积,  $\text{mm}^2$ 。

各浇道截面面积比如下:

$$\sum S_{\text{内}} : \sum S_{\text{横}} : \sum S_{\text{直}} : \sum S_{\text{包}} = 2.5 : 2.0 : 2.0 : 1.0 \quad (2)$$

根据冶炼车间生产计划钢包选用 $\Phi 70$  mm水口, 因此包孔总截面积:

$$\sum S_{\text{包}} = \pi r^2 = 3.14 \times 35^2 = 3\ 848\ \text{mm}^2 \quad (3)$$

直浇道总截面积:

$$\sum S_{\text{直}} = 2 \times \sum S_{\text{包}} = 3\ 848\ \text{mm}^2 \times 2 = 7\ 696\ \text{mm}^2 \quad (4)$$

横浇道总截面积:

$$\sum S_{\text{横}} = 7\ 696\ \text{mm}^2 \quad (5)$$

内浇道总截面积:

$$\sum S_{\text{内}} = 2.5 \times \sum S_{\text{包}} = 3\ 848\ \text{mm}^2 \times 2.5 = 9\ 620\ \text{mm}^2 \quad (6)$$

## 2.2 冒口的计算

目前国内应用比较普遍的冒口计算方法有模数法、补缩液量法和比例法。由于对主体的三维模型有了精确的计算, 因此采用模数法<sup>[16-18]</sup>, 即通过式(7)与式(8)配合计算。模数计算公式如下:

$$M = V/A \quad (7)$$

式中:  $M$ 为模数,  $\text{cm}$ ;  $V$ 为体积,  $\text{cm}^3$ ;  $A$ 为冷却表面积,  $\text{cm}^2$ 。

$$M_{\text{R}} = fM_{\text{C}} \quad (8)$$

式中:  $M_{\text{R}}$ 为冒口模数;  $M_{\text{C}}$ 为被补缩部分铸件模数;  $f$ 为模数扩大系数,  $f$ 取1.1~1.2, 明冒口 $f$ 取1.2, 顶暗冒口 $f$ 取1.1。

$$V_{\text{Cmax}} = \frac{\eta - \varepsilon}{\varepsilon} V_{\text{R}} \quad (9)$$

式中:  $V_{\text{Cmax}}$ 为可被冒口补缩的铸件最大体积;  $V_{\text{R}}$ 为冒口的初始体积;  $\eta$ 为冒口补缩效率, 这里我们采用保温发热冒口 $\eta$ 取25%;  $\varepsilon$ 为金属液的体积收缩率(%),  $\varepsilon$ 取7.0%。

利用UG三维模型计算功能对主体体积和表面积进行测量可以得到:

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{主体}} &= 97\ 038\ \text{cm}^3 \\ S_{\text{主体}} &= 27\ 334\ \text{cm}^2 \end{aligned} \right\}$$

$$\langle M = V/A = 97\ 038\ \text{cm}^3 / 27\ 334\ \text{cm}^2 = 3.55\ \text{cm} \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)可得:

$$M_{\text{R主体}} = fM_{\text{C主体}} = 1.1 \times 3.55 = 3.91\ \text{cm} \quad (11)$$

主体选用的顶暗冒口, 式中 $f=1.1$ 。

主体冒口选用的是两个 $270\ \text{mm} \times 405\ \text{mm} \times 500\ \text{mm}$ 腰圆发热保温冒口, 其冒口几何模数为6.3  $\text{cm}$ , 大于式(11)计算值, 选用的冒口安全系数均在1.6左右, 满足工艺设计要求。

将主体冒口体积数值代入式(9)进行校核, 可得:

$$V_{\text{Cmax主体}} = \frac{\eta - \varepsilon}{\varepsilon} V_{\text{主体}} = \frac{25\% - 7\%}{7\%} \times (2 \times 46\ 853\ \text{cm}^3) = 240\ 958\ \text{cm}^3 \quad (12)$$

由式(12)计算结果来看, 选用的冒口安全系数能有效保证铸件凝固过程中的补缩。

## 3 主体铸造工艺数值模拟分析

以上述主体铸造工艺的参数为基础, 完成主体UG三维工艺模型的设计和绘制, 保存为STL文件, 并导入ProCAST软件进行网格划分、材料设置、热物性参数和边界条件设置。模拟其温度场、应力场, 最后根据模拟结果分析工艺设计的合理性, 确定最优工艺方案。

### 3.1 主体铸件凝固过程温度场数值模拟

对如图2(a)所示的主体原工艺方案进行了数值模拟优化, 优化改进后的工艺方案如图2(b)、图2(c)所示。

图3、图4和图5分别为3种工艺方案在主体铸件凝固过程中的温度场分布、热节部位及缩孔缩松倾向模拟结果。从图3(a)、图4(a)和图5(a)中的热节

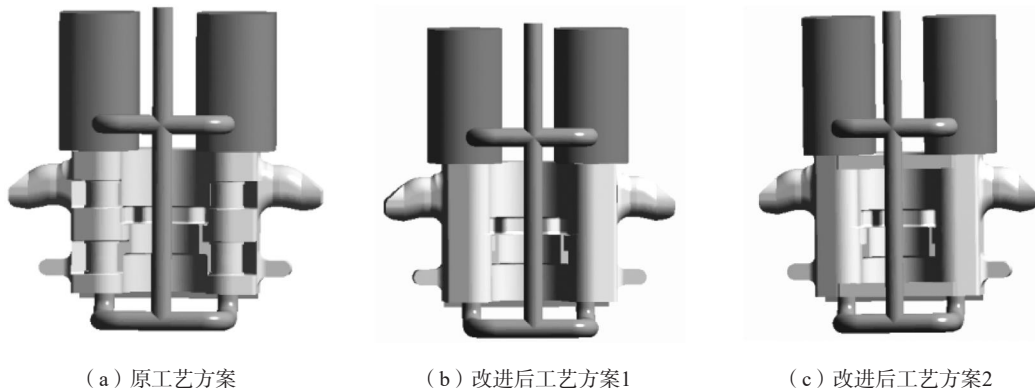


图2 液吊卡主体工艺优化方案  
Fig. 2 Process optimization scheme for main casting of hydraulic elevator

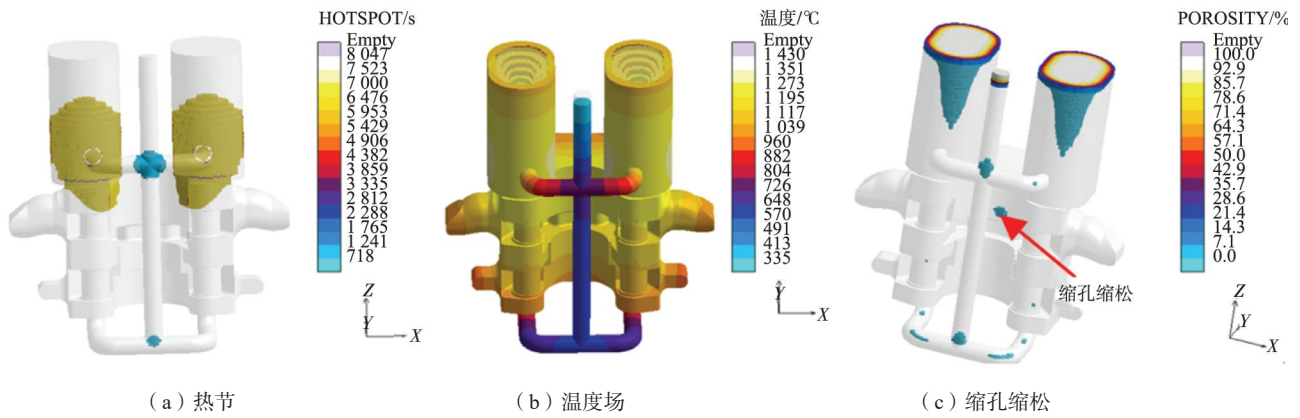


图3 原工艺方案凝固模拟

Fig. 3 Solidification simulation of the original process scheme

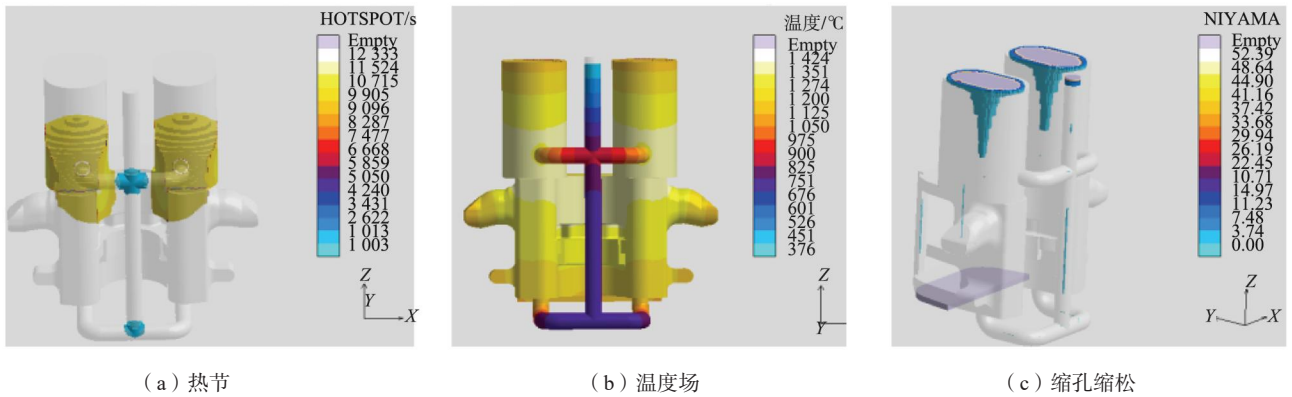


图4 工艺方案1凝固模拟

Fig. 4 Solidification simulation of the process scheme 1

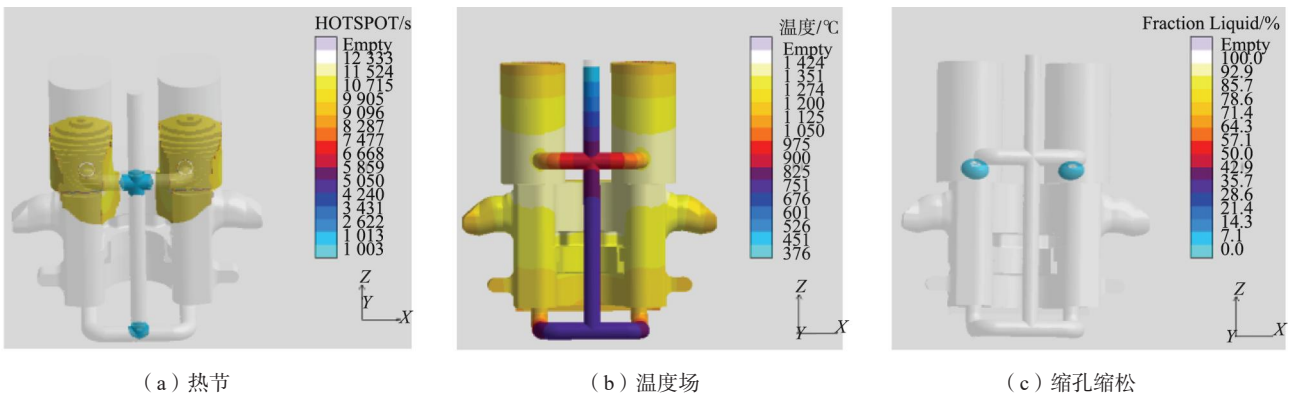


图5 工艺方案2凝固模拟

Fig. 5 Solidification simulation of the process scheme 2

分布来看, 3种工艺方案下, 铸件热节均集中在冒口根部, 有利于铸件的补缩。

从图3 (b)、图4 (b) 和图5 (b) 中的温度场分布可以看到, 主体冒口端呈黄亮色, 接近1 400 °C, 温度最高; 越往下, 主体温度逐渐降低, 到底端呈橘黄色, 温度降至1 000 °C左右; 浇注系统部分呈红色或蓝色, 温度最低。因此, 主体铸件从下而上顺序凝固。

图3 (c)、图4 (c) 和图5 (c) 是3种工艺方案的

缩孔缩松模拟结果。原工艺方案如图2 (a), 设计了补缩系统, 未设计拉筋, 交接面按设计图纸执行, 采用直角过渡; 由图3 (c) 缩孔缩松模拟结果可见, 主体背部心部存在缩孔缩松缺陷。工艺方案1如图2 (b) 所示, 去掉了补缩系统, 增加了主体背部拉筋以及外冷铁设计; 工艺方案2如图2 (c) 所示, 在工艺方案1的基础上增加了两道横向拉筋, 建议设计将交接面直角过渡改为圆角过渡。改进后的工艺方案1和工艺方

案2, 由于增设了外冷铁, 图4(c)和图5(c)结果显示, 该部位未再出现缩松铸造缺陷。

### 3.2 主体铸件凝固过程应力场数值模拟

图6、图7和图8分别为主体三种工艺方案的位移和应力场分布情况。从图6(a)、图6(b)和图6(c)中可以看到, 原工艺方案横向没有加持拉筋, 从x、y和z

三个方向的位移量很大, x方向达到12 mm左右, y和z方向达到6 mm左右。同时, 原工艺方案中, 主体背面都是直角过渡, 造成应力集中。从图6(d)中可以看到, 直角过渡部位属于截面突变位置, 厚的部位比薄的部位凝固速率慢, 而且蓄热大, 造成热应力集中, 应力超过600 MPa, 最大点达到1 000 MPa, 远远大于材料抗拉强度。因此, 此部位热裂倾向较大。

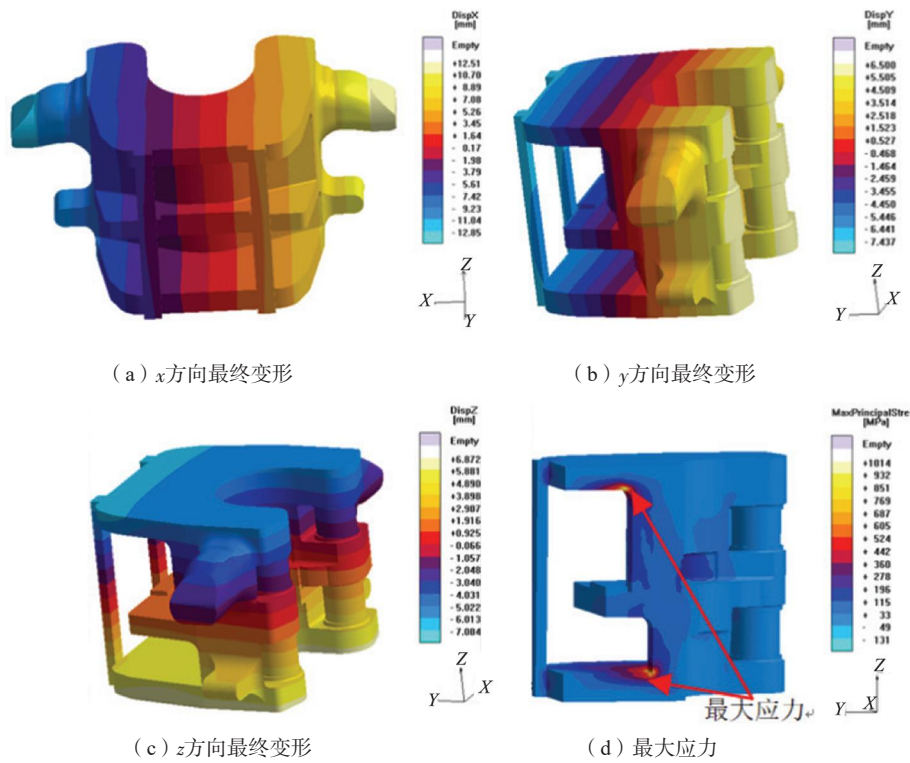


图6 原工艺方案应力场和位移场  
Fig. 6 Stress and displacement fields of the original process scheme

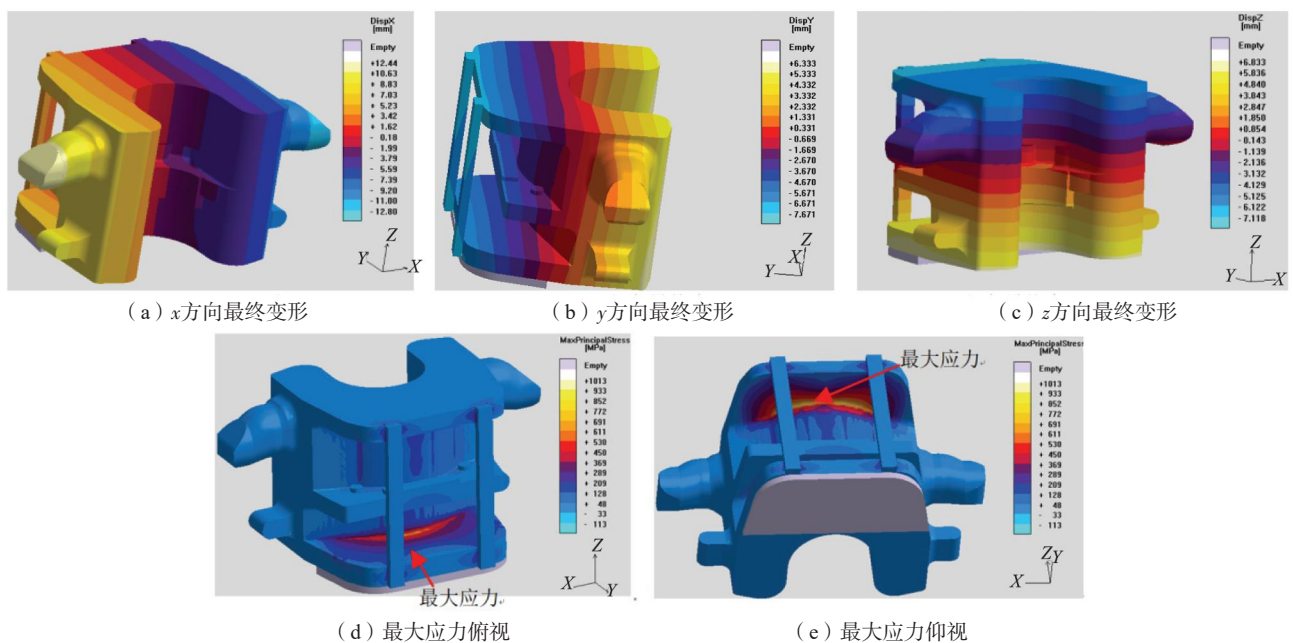


图7 改进后工艺方案1应力场和位移场  
Fig. 7 Stress and displacement fields of improved process scheme 1

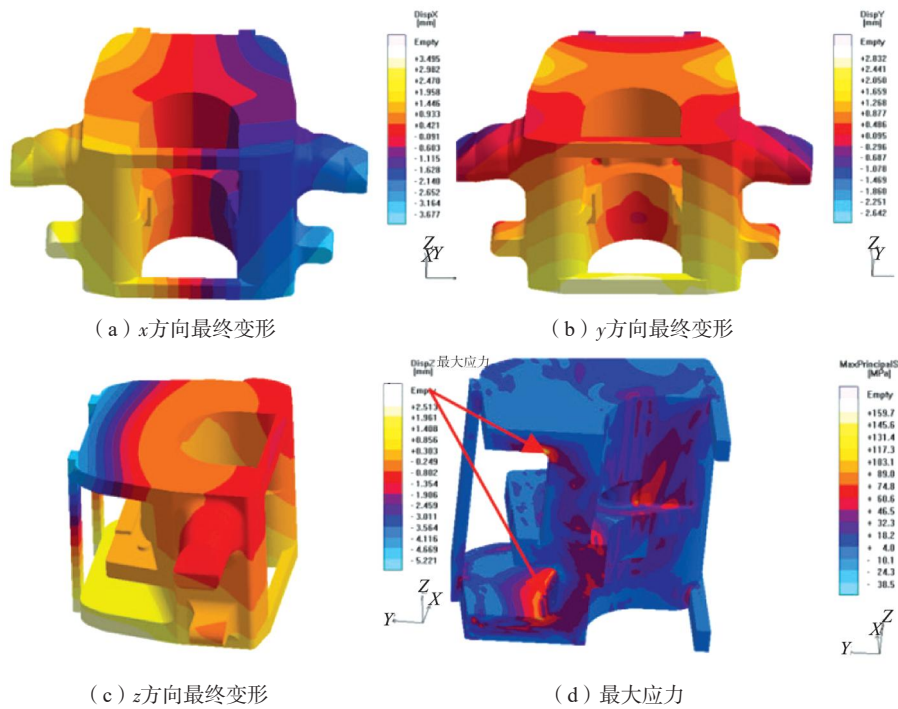


图8 改进后工艺方案2应力场和位移场

Fig. 8 Stress and displacement fields of improved process scheme 2

原工艺图6 (b) 和图6 (c) 及改进工艺方案1图7 (b)、图7 (c) 结果显示,  $x$ 轴方向变形12 mm左右;  $y$ 轴方向和 $z$ 轴方向变形6 mm左右, 变形量大, 而且主体背部直角过渡处应力值达1 000 MPa左右。

在原工艺方案基础上, 对主体结构状态进行了优化。工艺方案2去掉了原工艺补缩系统, 消除了此处的粘砂问题,  $x$ 轴方向增加了主体工艺拉筋, 对铸造过渡圆角进行优化, 改为 $R50$  mm圆角过渡, 减小应力集中, 降低此处热裂倾向。经过工艺方案2改进后, 应力计算结果如图8 (a)、图8 (b) 和图8 (c) 所示, 主体 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 三个方向的位移量只有1 mm左右; 主体背面拐角过渡处应力值明显减小, 图8 (d) 中显示, 应力最大点只有158 MPa, 远远低于主体材料抗拉强度和屈服强度。

通过对三种工艺方案应力场的分析, 我们发现,

出现热裂纹的部位均处于截面突变处。此处具有较大温度梯度以及较慢凝固速率的特点。根据热裂纹形成强度理论<sup>[19-26]</sup>, 主体在凝固后期, 由于铸件在收缩过程中受到砂芯阻力, 会产生拉应力及变形行为。当超过该温度下主体材料的强度极限或变形能力时, 铸件便会产生热裂纹。因此, 通过优化铸件结构, 增大交截面处 $R$ 角, 并在薄截面之间设置拉筋以增强其抗变形能力, 从而抵消热应力的影响, 达到防止热裂的目的。

## 4 生产验证

在传统模数法工艺设计的基础上, 采用ProCAST模拟软件优化改进后的工艺方案, 对主体铸件进行试验生产及型式试验。如图9所示, 铸件外观轮廓清晰, 无冷隔、气孔等表面缺陷。机加工之后, 进行无损检测 (磁粉、超声) 探伤确认, 铸件内部组织致密, 无



(a) 加工之后的主体构件



(b) 装配进行型式试验的主体构件

图9 实际铸造加工并装配试验的主体构件

Fig. 9 The main body component by actual casting, machining, mounting and testing

裂纹、缩孔缩松等铸造缺陷。将液压吊卡主体构件装配，并进行2倍载荷的型式拉力试验，试验结果完全满足工业使用的性能要求。

## 5 结论

(1) 液压吊卡主体铸造采用开放式浇注系统与腰圆发热保温冒口的组合设计，可实现钢液快速平稳充型与有效补缩，去除工艺补缩筋还能有效避免铸件粘砂类铸造缺陷的产生。

(2) 在铸件心部缩松易发区域增设外冷铁，可加快局部冷却速度、优化凝固顺序，实现定向冷却，从根本上消除该部位的缩孔、缩松缺陷，提升铸件内部

组织致密性。

(3) 将铸件截面直角过渡优化为R50 mm圆角过渡，并增设防变形拉筋，能显著降低截面突变处的应力集中，大幅减小铸件凝固过程中的变形量，使铸件最大应力降至材料强度范围内，彻底解决热裂纹问题。

(4) 传统铸造工艺设计方法与CAE数值模拟技术相结合的模式，可精准预判铸件缺陷位置与成因，大幅缩短工艺试制周期、降低废品率，采用优化工艺生产的液压吊卡主体铸件，各项指标均满足API Spec 8C (2012)的PSL1级质量验收要求，该方法可为同类复杂低合金高强度铸钢件的铸造工艺设计与优化提供重要的工程参考。

### 参考文献:

- [1] 罗志远, 黄芳飞, 冯起赠, 等. 液压吊卡液压系统优化设计的探讨 [J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58 (7): 44-49.
- [2] 马强维. 基于液压翻转式吊卡的研制探索 [J]. 中国设备工程, 2022 (4): 113-114.
- [3] 王汝泽, 王世刚, 闫家振, 等. 液压吊卡研制及结构强度分析 [J]. 石油矿场机械, 2021, 50 (6): 38-44.
- [4] 崔海朋. 液压吊卡力学分析与计算 [J]. 机电工程技术, 2019, 48 (7): 44-46.
- [5] 鹿传祥. 液压吊卡的应用与安全性分析 [J]. 现代制造技术与装备, 2017 (8): 124-125.
- [6] JI M, LI Q, CHEN X, et al. Optimization of the semi-continuous casting process for large-scale magnesium rare-earth alloy slabs based on ProCAST simulation [J]. Journal of Materials Engineering Performance, 2026, (prepublish): 1-16.
- [7] DONG J, SHU N, XIONG Z. ProCAST-based valve body casting process design [C]// 2024 39th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC). IEEE, 2024: 2319-2322.
- [8] 牛海峰, 倪佩佩. 冷水机组换热器水室设计与应力分析 [J]. 机械制造与自动化, 2018, 47 (5): 92-94.
- [9] 韩亚斌, 郑霏, 刘冬冬. 厚大中开面多级离心泵缩尺控制及铸造工艺研究 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (11): 948-951.
- [10] 蔡佳骏, 张亮, 夏双喜, 等. 高压蒸汽室铸钢件砂型铸造工艺模拟研究 [J]. 金属加工 (热加工), 2024 (5): 109-115.
- [11] 聂金成, 叶洁云, 汪志刚, 等. 基于ProCAST数值模拟的马氏体不锈钢折流器铸造工艺优化 [J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11 (6): 27-33.
- [12] 肖博予, 戴建平, 宋相坤. 采煤机铸钢件冒口设计与计算方法发展综述 [J]. 煤矿机电, 2023, 44 (3): 16-20.
- [13] 高守俊, 韦民, 龚连金, 等. 主减速器壳铸件缩孔缩松缺陷分析与工艺改进 [J]. 铸造工程, 2022, 46 (6): 49-52.
- [14] 杨清, 李爽, 王旭, 等. 大型框架铸钢导轨铸造工艺设计与优化 [J]. 铸造, 2022, 71 (9): 1163-1168.
- [15] 弓成美琪, 汪东红, 吴文云, 等. 单晶空心涡轮叶片凝固过程变形数值模拟研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (8): 951-955.
- [16] 郭雄, 陶飞, 史卫杰, 等. 燃机透平叶片热裂缺陷的形成机理研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (11): 1365-1369.
- [17] 文生琼, 刘岩, 徐云龙, 等. 基于ProCAST仿真的型芯型壳一体化空心涡轮叶片反变形精度控制 [J]. 精密成形工程, 2024, 16 (12): 116-123.
- [18] 马静, 王林春, 张宁, 等. 某钛合金条形结构件铸造工艺分析及优化 [J]. 铸造, 2025, 74 (8): 1112-1118.
- [19] ZHAI X, ZHANG Y, KANG G, et al. Simulation of the TNT-based melt-cast explosive charging process using hot mandrel assisted solidification [J]. Computers and Structures, 2025, 315: 107780.
- [20] QI F, WANG C, XU W. Ballistic protection and damage mechanism of ceramic composite armor under two-dimensional pre-stressed constraints by molten metal casting [J]. Aerospace Science and Technology, 2025, 159: 110021.
- [21] 单爱丽, 鲍培玮, 邢书明, 等. 基于ProCAST的摩托车架低压铸造方案分析与优化 [J]. 铸造, 2023, 72 (10): 1329-1335.
- [22] 张帆, 张进. 基于ProCAST的铝合金罩盖重力铸造成型的模拟优化 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (5): 80-83.
- [23] 史东丽, 钱坤才. 大型高铬铸铁叶轮凝固过程应力场数值模拟及铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2020, 69 (9): 972-976.
- [24] ZHU Yankang, ZHOU Kangkang, XU Gangqiang, et al. Crack formation of camshaft castings: hot tearing susceptibility and root causes [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 147.
- [25] 肖伊洲, 常汀凯, 纪艳卿, 等. 工艺参数时变扰动与铸件缩松缺陷关联关系 [J]. 热加工工艺, 2026, 55 (2): 87-95.
- [26] 杨武强, 冀晓磊, 王琳, 等. 基于ProCAST本体件熔模铸造工艺优化设计 [J]. 铸造, 2023, 72 (11): 1477-1481.