

基于铸造 CAE 仿真技术的铸钢件 工艺优化研究与应用

樊超,于大威,王虎明,宝喜庆,樊建勋,刘跃辉,于海洋,前里舸尔,张晓敏,左文博
(内蒙古第一机械集团股份有限公司 第一分公司,内蒙古 包头 014032)

摘要:转向节铸钢件是某轮式车辆转向系统组成中的关键零部件,机械加工后轴向部位不允许出现任何缺陷。针对原铸造工艺生产过程中,产品热节较大的圆弧部位存在夹砂等铸造缺陷的问题,对该产品铸造工艺进行优化设计,并采用铸造 CAE 模拟仿真技术进行可视化模拟结果分析。经生产验证,优化后工艺显著减少了铸造缺陷,持续提升产品质量合格率。

关键词:铸钢件;铸造 CAE 仿真技术;工艺优化

中图分类号: TG26

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2022)10-0929-06

Research on Steel Process Optimization Based on CAE Simulation Casting Technology

FAN Chao, YU Dawei, WANG Huming, BAO Xiqing, FAN Jianxun, LIU Yuehui, YU Haiyang,
QIANLI Geer, ZHANG Xiaomin, ZUO Wenbo

(First Branch, Inner Mongolia First Machinery Group Co., Ltd., Baotou 014032, China)

Abstract: Steel steering knuckle casting is a key component in the steering system of wheeled vehicles. After machining, no defects are allowed in the axial part. According to the original casting process, casting defects such as sand inclusions were found to exist in the large arc part with a thermal center of the product. To solve this problem, optimization of the casting process design is conducted using casting CAE simulation technology to realize the visual analysis of the simulation results. Actual manufacturing shows that the optimized process significantly reduces casting defects and continuously improves the product quality qualification rate.

Key words: steel castings; CAE simulation technology of casting; process optimization

计算机模拟仿真作为核心的数字化铸造已在铸造领域中得到广泛应用^[1],随着计算机技术及模拟分析软件的发展,铸造模拟仿真技术开始应用于实际生产过程,使得传统铸造工艺设计模式得到极大改变^[2-3]。转向节铸钢件是某轮式车辆转向系统组成中的关键零部件^[4],该产品内部质量要求较高,机械加工后轴向部位不允许出现任何缺陷。受产品结构所限,按照原铸造工艺进行生产,在机械加工过程中发现该产品热节较大的 R85 mm 圆弧部位存在夹砂等铸造缺陷,主要集中在 R85 mm 圆弧的下平面上,铸件不合格率达到了 21%。本文通过运用铸造模拟仿真技术优化工艺设计,显著改善了转向节产品机械加工后夹砂等缺陷,持续提升转向节产品

质量合格率。

1 产品结构及原工艺方案

转向节铸钢件是某轮式车辆转向系统组成中的关键零部件,产品平均质量约 85 kg,外形尺寸为 465 mm×266 mm×444 mm,属于箱体类结构中的小型零件。转向节铸钢件三维立体图如图 1 所示,该产品机械加工后内部质量要求较高,铸造工艺设计难度较大,化学成分见表 1。

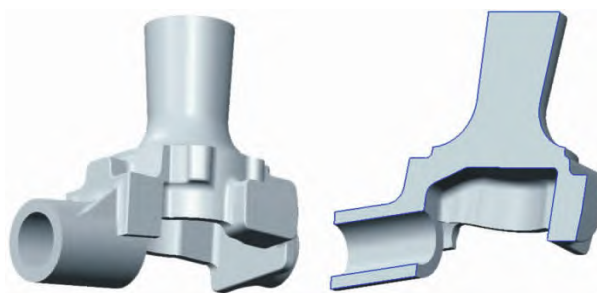


图 1 铸件及内部结构三维图

Fig.1 Three-dimensional diagram of casting and internal structure

收稿日期: 2022-06-13

作者简介: 樊超(1984—), 学士, 高级工程师。主要从事铸造成型工艺、铸造 CAE 模拟仿真技术及三维逆向工程技术方面的工作。电话: 15904728886, Email: fc15904728886@163.com

表 1 铸件的化学成分 w/%
Tab.1 Chemical composition of casting

钢种	C	Si	Mn	P	S	Fe
ZG30Mn	0.29~0.36	0.40~0.80	1.30~1.90	≤0.040	≤0.040	Bal.

转向节铸钢件造型生产采用 DS80 酯硬化水玻璃砂自动化造型生产线^[5], 工艺流程为套箱、混砂、震实、表干、脱模、下芯、合箱、浇注^[6], 制芯采用高溃散无机黏结剂水玻璃砂, 二氧化碳辅助硬化。根据转向节铸钢件产品结构, 在 R85 mm 圆弧底端处分型, 分型面以下复杂结构位于下箱, 下箱设计 4 个芯子形成铸件内腔结构, 其余都在上箱, 上箱最上端设置 $\phi 300$ mm/ $\phi 180$ mm $\times 210$ mm 明冒口, 用于集砂、排气、补缩, 采用中注式浇注系统, 尾部凸台部位设置 $\phi 20$ mm $\times 135$ mm 内冷铁及适量特种砂, 中间支撑台部位设置 $\phi 20$ mm $\times 90$ mm 内冷铁及适量特种砂。上箱设计为明拔工艺, 为利于起模操作, 上模型在 R85 mm 与拔模斜度交接处采用“分体式”设计, 分体工装中间设计为 $\phi 50$ mm $\times 55$ mm 的凹槽, 上模型的固定工装中间设计为 $\phi 49.5$ mm $\times 50$ mm 的凸起, 造型操作时人工将上模型分体工装, 利用凹槽与固定工装的凸起部分紧密配合, 达到固定工装的目的, 如图 2 所示。

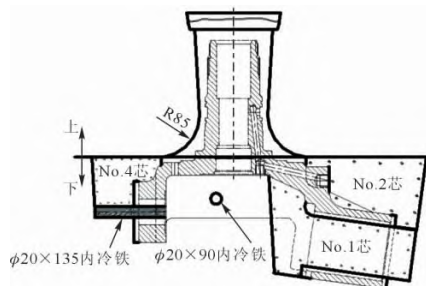


图 2 铸造工艺简图

Fig.2 Casting process drawing

工艺布置为一型两件, 浇注系统采用“开放式”设计^[7], 模型共用 1 条直浇道, 直浇道尺寸设计为 $\phi 50$ mm $\times 400$ mm; 1 条横浇道, 横浇道尺寸设计为 45 mm/50 mm $\times 45$ mm; 2 条内浇道, 内浇道尺寸设计为 35 mm/45 mm $\times 30$ mm, 浇注系统截面比例为 1.00:1.09:1.22。金属液通过内浇道注入型腔中, 浇注温度设计为 1 560~1 580 °C, 浇注时间为 18~33 s, 转向节铸造工艺三维模型, 如图 3 所示。

2 数值模拟与结果分析

2.1 模拟参数设置

首先使用三维建模软件 Creo2.0 对铸件工艺进行建模, 然后采用 ProCAST 软件对其进行工艺模拟。通过对三维实体铸造工艺模型进行网格划分^[8],



图 3 零件铸造工艺三维图

Fig.3 Three-dimensional drawing of casting process

如图 4 所示, 将网格尺寸冒口非重要部分设为 28 mm, 其他重点部分设为 6 mm, 面网格数量为 156 286, 体网格数量为 627 892。

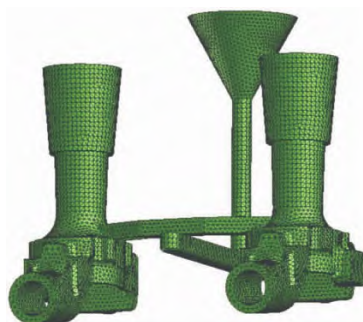


图 4 工艺模型网格划分

Fig.4 Meshing of process model

转向节铸钢件选用材质为 ZG30Mn, 造型材料为优质石英砂。应用 ProCAST 的前处理模块对有限元三维模型进行边界条件、材料性能、浇注条件等模拟参数进行设置^[9], 见表 2。

表 2 参数设置
Tab.2 Parameter Settings

参数名称	实际参数设置
材料	铸件: 铸钢 30Mn
	铸型: 优质石英砂
界面换热系数	$h=500$ W/(m ² ·K)
边界条件	浇注速度: 12 kg/s
	冷却方式: 空冷
初始条件	浇注温度: 1 570 °C
	铸型初始温度: 25 °C
浇注方式	砂型重力浇注
重力方向	-Y 方向
运算时间	充型流动: 25 s
停止条件	900 °C

2.2 模拟结果分析

(1) 充型过程 转向节铸钢件铸造工艺采用砂型重力浇注, 通过充型模拟结果分析可知, 产品浇注温度高、充型时间短, 铸造型腔全部充满钢液时, 转向节铸钢件所处温度仍然在液相线以上, 没有浇不

足的现象。图 5 为钢液充型过程。由图 5(a)可知,浇注开始时,钢液从浇口管平稳进入浇注系统。由图 5(b)可知,钢液从内浇道进入铸造型腔时,直接冲刷中间型砂平台部位,然后钢液沿铸造型腔壁向下充型。如图 5(c~d)所示,最后钢液由下向上充满铸造型腔。

(2)凝固过程 转向节铸钢件凝固时固相率达到了 61.6%时,钢液在动画中消失,转向节铸钢件凝固过程整体呈现从下而上的顺序凝固,冒口周围

边缘区域先行凝固,而冒口部位最后凝固。从温度场可以看出,转向节铸钢件在凝固冷却过程中,轴向中心厚大部位处存在孤立液相区,凝固后期易产生缩孔缺陷,见图 6。

从转向节铸钢件凝固后期缩孔整体分布图可以看出,轴向中心的厚大部位存在缩孔缺陷机率较大,最终凝固时轴向中心的缩孔缺陷上方如没有足量钢液补缩,实物将形成缩孔缺陷,见图 7。

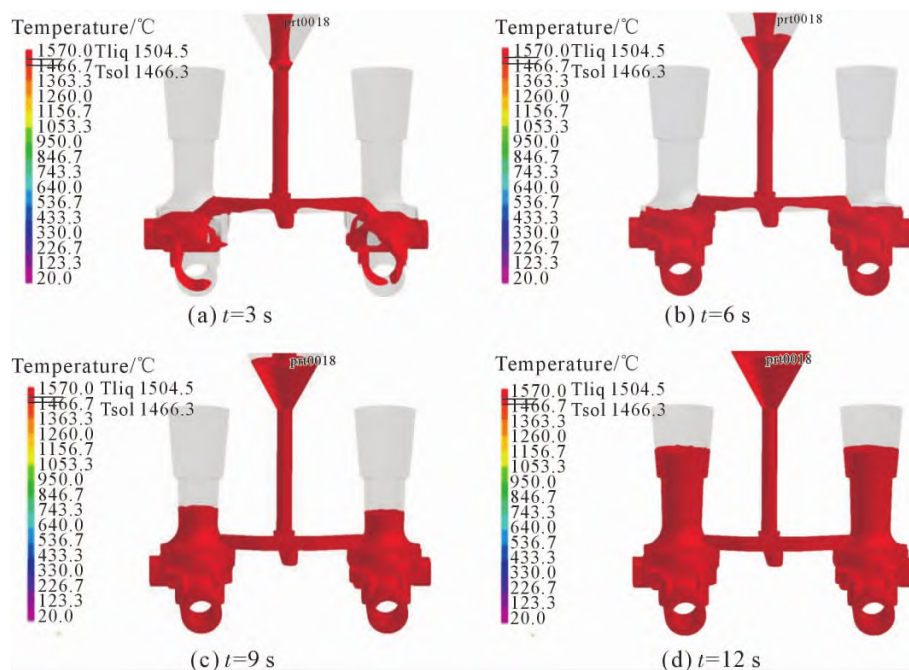


图 5 模拟充型过程

Fig.5 Diagram of simulated filling process

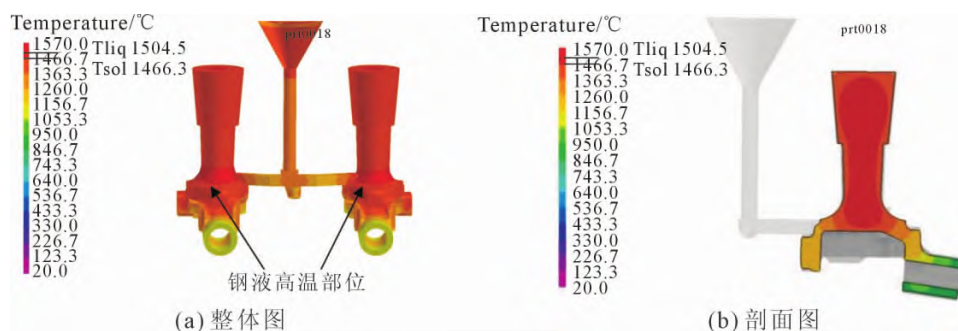


图 6 模拟凝固过程

Fig.6 Diagram of simulated solidification process

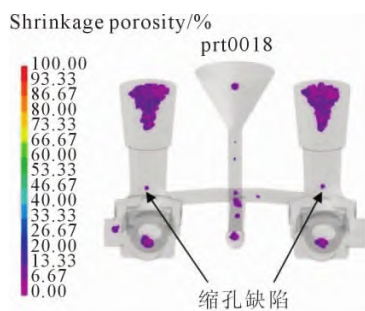


图 7 铸件缩孔分布

Fig.7 Casting shrinkage distribution

2.3 缺陷形成分析

转向节铸钢件结构不规则,分型面下方主要是复杂薄壁结构,而分型面上方轴向尺寸厚、体积大,符合整体顺序凝固原则。如图 8 所示,分型面下方的两处支撑台位置壁厚尺寸较大,浇注钢液时支撑台上方薄壁凝固较快,形成独立空间,在热节处易引起缩孔等铸造缺陷。分型面上方轴向形状不规则,颈部位置呈缩口状,造成浇注后颈部先行凝固,上方钢液无法及时补缩,颈部下方钢液凝固收缩形成封闭体,产生热节问题,引起缩孔等铸造缺陷。另外,



图 8 铸件加工后缺陷部位
Fig.8 Casting defects after machining

转向节铸钢件工艺设计中的内浇道呈一定角度由中部进入砂型型腔,内浇道入口方向对应凸台位置,易将型腔中的浮砂冲到凸台死角处,由于轴向颈部结构的限制,不利于进一步将浮砂上浮到冒口中,造成夹砂等缺陷。所以,转向节铸钢件的主要缺陷是缩孔、夹砂等。

3 工艺优化及模拟分析

结合转向节铸钢件模拟仿真结果分析与实物缺陷部位可以看出,产品不规则结构限制与浇注系统设计不合理共同导致转向节铸钢件产生缩孔、夹砂等缺陷,现优化铸造工艺方案如下:

(1)将分型面上方 R85 mm 圆弧减小到 R65 mm (见图 9),减小热节并降低加工成本。

(2)下砂型的平面设计增加一个 $\phi 60\text{ mm} \times 55\text{ mm}$ 的小型砂台(图 9),利于加快散热、减少杂质聚集降低加工成本。

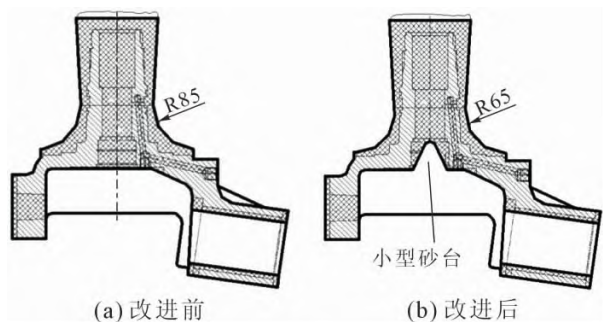


图 9 工艺结构优化对比图
Fig.9 Comparison diagram of process structure optimization

(3)将中注式调整浇注系统优化为底注式浇注系统,形成自下而上的钢液顺序凝固。优化后的内浇道绕过下模型中的 NO.3 砂芯外轮廓,不影响 NO.3 砂芯的正常下芯操作(图 10)。在 NO.3 砂芯下芯前,将内浇道周围均匀涂刷 2 遍醇基锆英粉涂料,避免高温钢液长时间冲刷砂型带入非金属夹杂物。

为验证上述工艺优化效果,使用 ProCAST 设置



图 10 工艺优化后三维图
Fig.10 Three-dimensional diagram after process optimization

工艺优化前的相同数值模拟参数,通过对三维实体铸造工艺模型进行网格划分^[10],如图 11 所示,网格尺寸冒口非重要部分设为 28 mm,其他重点部分设为 6 mm,面网格数量为 165 928,体网格数量为 627 892。

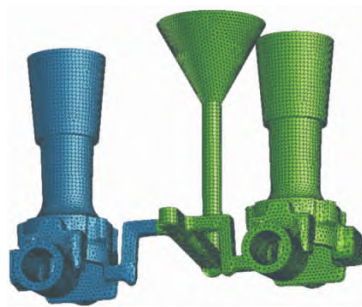


图 11 优化工艺三维网格化
Fig.11 Meshing of optimized process

从图 12 优化转向节铸钢件工艺后模拟钢液充型过程可以看到,在开始充型时,钢液由内浇道进入型腔底部,随着充型的持续进行,钢液按照由下而上的顺序平稳充型,最终完全凝固。

从图 13 转向节铸钢件工艺优化后的温度场变化图可以看到,液相红色高温钢液按照整体凝固顺序上移,在凝固过程中达到远离厚大冒口的部位先行凝固、冒口部位最后凝固的效果。在温度场变化图的剖视图中可以看到转向节铸钢件凝固时厚大部位消除了孤立液相区^[11],冒口部位是最高温度部位,保证将非金属夹杂物顺利上浮到冒口内。

图 14 为工艺优化后缩孔缺陷分布图。转向节铸钢件工艺优化后整体缩孔铸造缺陷的分布情况显示,在圆弧 R65 mm 的颈部区域未产生任何铸造缺陷,说明工艺改进方案合理。此外,按照模拟结果分析,在实际生产过程中尾部凸台部位设置 $\phi 20\text{ mm} \times 135\text{ mm}$ 内冷铁及厚度 $\geq 25\text{ mm}$ 适量特种砂,中间支撑台部位设置 $\phi 20\text{ mm} \times 90\text{ mm}$ 内冷铁及厚度 $\geq 25\text{ mm}$ 适量特种砂,试加工后未发现缩孔铸造缺陷,效果良好。

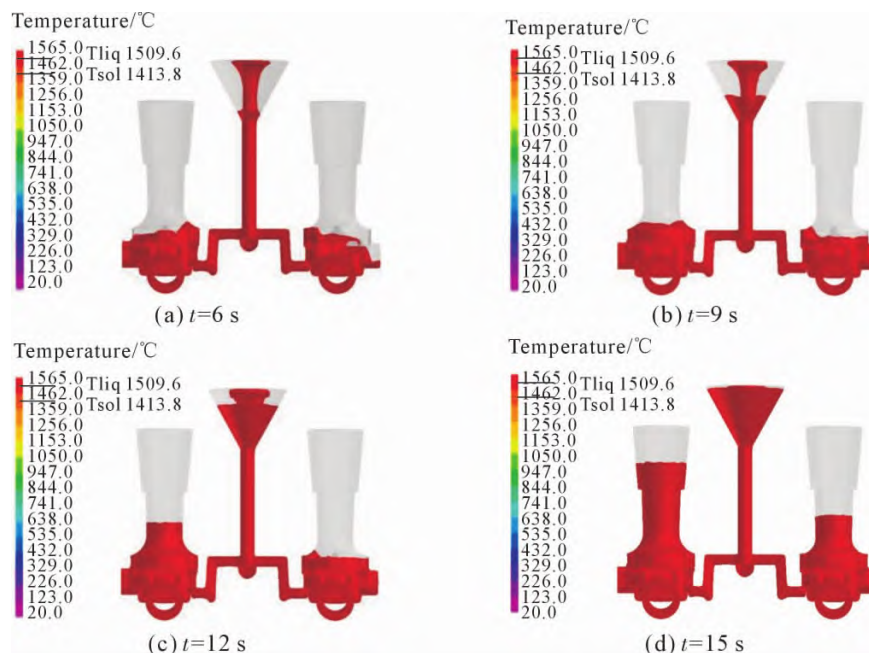


图 12 工艺优化后流场变化图

Fig.12 Changes of flow field after process optimization

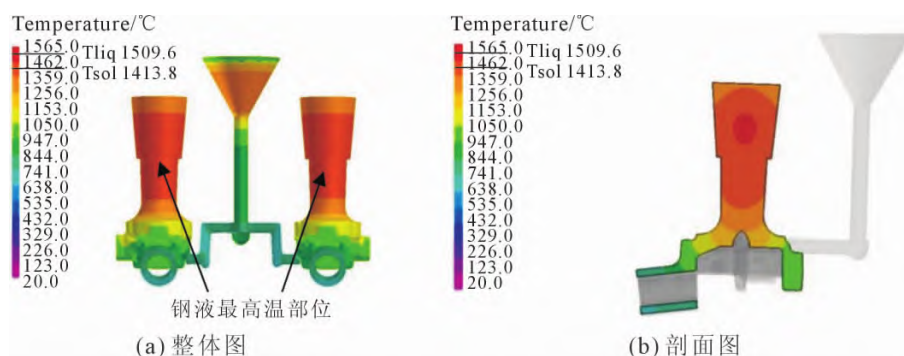


图 13 工艺优化后温度场变化图

Fig.13 Changes of temperature field after process optimization

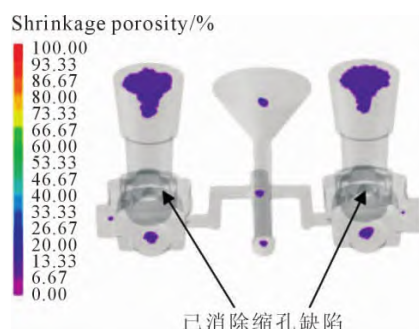


图 14 工艺优化后缩孔缺陷分布图

Fig.14 Distribution of shrinkage cavity defects after process optimization

4 生产验证

为进一步验证转向节铸钢件工艺优化后模拟仿真结果,分析在实际生产中是否有辅助指导性,在 ProCAST 中,将工艺优化前后的相关参数设为一致,按照转向节铸钢件工艺优化措施生产铸件 216

件,其中 3 件转向节铸件发生砂眼等缺陷,铸件质量综合合格率达到 98.6%以上。对工艺优化后的转向节铸钢件厚大部位进行试加工及解剖验证(图 15),横向与纵向加工解剖结果均无任何铸造缺陷,结果表明。通过铸造 CAE 模拟仿真技术选择合理的铸造工艺可显著提高铸件质量。



图 15 工艺优化后铸件解剖图

Fig.15 Casting section after process optimization

5 结论

(1)运用铸造 CAE 模拟仿真技术辅助工艺设计,较准确地预测了转向节铸钢件铸造缺陷的产生部位,模拟结果与实物缺陷分布基本一致。

(2)铸造 CAE 模拟仿真技术可大幅缩短工程技术人员试制新产品生产与攻关产品质量问题的工艺验证周期,减少不必要的重复性工作。

(3)采取优化措施显著提高了转向节铸钢件的产品质量合格率,铸件不合格率由优化工艺前的 21%降低到了 1.4%,增加了产品经济效益。

参考文献:

- [1] 熊守美. 铸造过程模拟仿真技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [2] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册(5)[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.
- [3] 柳百成,荆涛. 铸造工程的模拟仿真及质量控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [4] 李晨希. 铸造工艺设计计及铸件缺陷控制[M]. 北京:化学工业出版社, 2009.
- [5] 荆涛. 凝固过程数值模拟[M]. 北京:电子工业出版社, 2002.
- [6] 刘桐旺. 金属型铸造凝固过程中界面热交换系数的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
- [7] 柳百成. 铸造技术与计算机模拟发展趋势[J]. 铸造技术, 2005, 26(7): 611-616.
- [8] 周建新. 计算机模拟仿真技术现状及发展趋势[J]. 铸造, 2012(10): 1105-1115.
- [9] 樊超,杜志强,刘江,等. 利用发热保温冒口解决钩体头部缩孔缺陷的探索[J]. 铸造技术, 2017, 38(12): 3021-3023.
- [10] 樊超,王光明,张挨元,等. ProCAST 模拟仿真技术在铸钢件缺陷预测中的应用[J]. 铸造技术, 2019, 40(7): 705-711.
- [11] 张挨元,贾枝树,樊超,等. 一种中小型铸钢件精益化通用铸造生产方法[J]. 铸造技术, 2021, 42(2): 108-112.
- [12] 赵富,赵银虎,刘斌,等. Procast 仿真技术在铸钢件缺陷预测上的探讨与应用[J]. 新技术新工艺, 2010(11): 102-105.
- [13] 马敏团,陈鹏波,黄引平,等. Procast 在铸造工艺优化中的应用[J]. 热加工工艺, 2006, 35(1): 52-57.
- [14] 樊超,张挨元,杜志强,等. Procast 模拟仿真技术在平衡肘支架铸造缺陷预测方面的应用[J]. 铸造技术, 2019, 40(4): 394-396.
- [15] TEWARI A, BISWAS P. Effect of amount, size, and spatial distribution of intermetallics on incipient localization during plastic deformation[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45: 1567-1578.