

高速列车牵引支架的铸造工艺优化

史东丽¹, 曹松², 朱宇¹, 邵宗辉¹

(1. 常州机电职业技术学院 机械工程学院, 江苏常州 213164; 2. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

摘要: 对高速列车转向架的核心零部件牵引支架的铸造工艺进行探索研究。通过使用铸造数值模拟软件MAGMAsoft, 对所设计的铸造工艺方案的充型和凝固过程进行仿真研究, 预判了缩孔、缩松缺陷的位置。然后针对缺陷提出三种工艺方案, 经过分析对比, 最终确定了牵引支架科学合理的铸造工艺方案, 为实际生产提供了技术指导。

关键词: 牵引支架; 数值模拟; 铸造工艺设计; 凝固仿真

牵引支架是国外高速列车转向架中的核心零部件, 其铸造性能的好坏将很大程度上影响高速列车运行的安全性, 所以要求其铸件不仅要有足够的力学性能, 更不能存在缩孔、缩松、夹渣等铸造缺陷^[1]。从减少产品缺陷、降低生产成本和提高生产效率等方面考虑, 在对产品进行实际规模生产前, 非常有必要运用现已成熟的计算机技术^[2-3], 对牵引支架在铸造中可能出现的缺陷、位置及其变化规律进行研究, 从而为生产提供技术指导。本文通过采用基于有限元法(FEM)的仿真分析软件MAGMAsoft, 对铸件充型和凝固过程进行模拟分析, 并对工艺方案不断调整和反复模拟^[4-5], 直至确定最合理的浇注系统方案。

1 铸件结构特点

牵引支架总体外形尺寸为440 mm × 377 mm × 359 mm, 材质为铸钢G20Mn5 QT (QT为调质处理), 其化学成分见表1, 此外还要求合金元素总量Cr+Mo+Ni+V+Cu ≤ 1.0%, 型砂采用酯硬化水玻璃自硬砂, 铸件毛坯重量为175 kg。牵引支架为复杂结构件, 由多个凸台、加强筋板、沟槽及底座等组成, 如图1所示。此外, 铸件的壁厚变化也较大(9.8~111.3 mm), 从而导致热节多。可以预见其在铸造过程中, 会面临着类似文献[6]中的技术难点: 铸件结构复杂, 起模困难, 易变形; 铸件热节多, 容易产生疏松、缩孔等缺陷。

2 铸造工艺模拟分析

2.1 仿真工艺参数设置

参数设置包括界面参数: 模具材料设置为铸型砂, 且在浇注过程中考虑传热, 传热系数设定为800 W/(m²·K); 浇注温度设置为1 580 ℃; 浇注时间: 利用经验公式 $t=S_1\sqrt[3]{\delta G}$, 式中 S_1 为与壁厚有关的系数, δ 为铸件壁厚(mm), G 为铸件重量

表1 G20Mn5+QT铸钢化学成分
Table 1 Chemical compositions of G20Mn5+QT cast steel $w_B/\%$

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	CeV
0.17~0.23	≤0.5	1~1.6	≤0.02	≤0.02	≤0.8	≤0.3	≤0.12	≤0.03	≤0.3	≤0.42

作者简介:

史东丽(1980-), 女, 副教授, 主要从事数值模拟研究工作。电话: 13775114189, E-mail: 601516495@qq.com

中图分类号: TG242

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2021)12-1476-05

基金项目:

江苏省高等职业教育高水平骨干专业建设项目(苏教高[2017]17号)。

收稿日期:

2019-08-01 收到初稿, 2021-07-14 收到修订稿。

(kg), 求得时间为20.07 s。

2.2 浇注工艺方案

浇注系统如图2所示。结合支架的结构特征, 采用侧注式顶冒口浇注系统。同时基于生产经验, 为了消除铸件中可能出现的缩松, 在一些特定部位设计了冒口。此外, 还在侧面和底面的两对凸台, 分别设计了两对冷铁, 规格尺寸分别为 $\Phi 24 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 、 $\Phi 80 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。

2.3 充型过程模拟结果与分析

模拟结果如图3所示, 结果显示共有5个区域存在明显的缩松、缩孔现象。从其结构特征可看到, 在相邻的两个连接部位存在较大的厚度差, 从而导致钢液

在这些部位凝固时, 由于体积收缩得不到补充, 最终导致缩孔缺陷的形成。为此, 需要采取必要的措施加以改进。

目前研究表明, 解决缩孔、缩松缺陷的有效方法是, 保证铸型中的金属液按顺序凝固, 即最先凝固的部位得到较慢凝固部分的补缩, 而较慢凝固的部位得到冒口的补缩, 最后使缩孔和缩松集中在冒口中^[7]。为此, 设计了如图4所示的三种工艺改进方案, 进行模拟仿真, 得到了如图5所示的各方案缩松、缩孔分布云图。

方案一, 增加冷铁, 规格为 $\Phi 80 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的冷铁厚度增加到40 mm, 如图4a所示。方案二, 在原方案中出现缩松、缩孔的部位增加成形冷铁, 原 $\Phi 90 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$ 的两个冒口尺寸更改为 $\Phi 120 \text{ mm} \times 155 \text{ mm}$; 更改浇道位置, 如图4b所示。方案三, 基本保留方案二中冷铁的布局、冒口尺寸, 但将方案二中的 $\Phi 120 \text{ mm} \times 155 \text{ mm}$ 冒口更改为Y100 mm $\times 150 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ 腰圆型冒口; 改变两段连接圆柱的形状; 增加一条内浇道, 并将内浇道的位置移至U形槽的下壁处, 如图4c所示。

从图5可以看出, 方案一在对缩孔部位仅增设一个冷铁以及增大冷铁厚度后, 有两个冒口的补缩被打断, 导致部分缩松留在了铸件内, 没有发挥出应有的

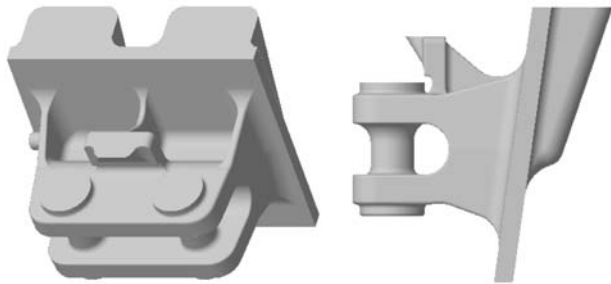


图1 牵引支架三维模型

Fig. 1 3D model of traction bracket

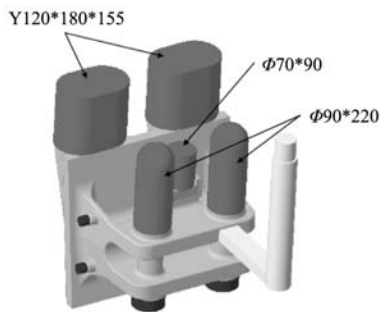


图2 浇注工艺方案

Fig. 2 Pouring system scheme

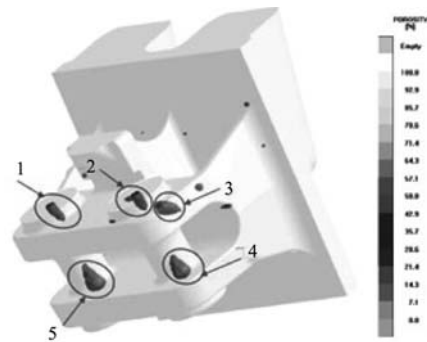


图3 缩孔、缩松分布区域

Fig. 3 Simulated shrinkage and dispersed shrinkage distribution

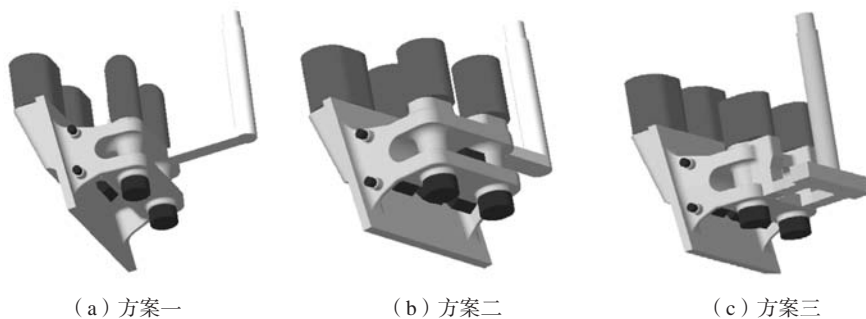


图4 不同工艺方案布局图

Fig. 4 Layout of different process schemes

补缩作用,从而无法改善原浇注方案中区域1和3处的缩松缺陷。由于U形槽底部冷铁的作用,原方案中区域2处的缩孔被消除,但在其两侧又出现了缩松,而且原方案中区域4和5两处的缩孔并没有得到改善,见图5a,所以此方案不可行。

相较于方案一,方案二在增大冒口截面尺寸以及在相应部位增加冷铁后,原方案区域1和3处的缩松得到明显改善,全部集中到了冒口中,而且区域2、4和5处的缩孔也有所改善,但在铸件中仍有明显的缩松存在,见图5b,所以此方案亦不理想。

方案三相比于前两种方案,基本保留了原有的冷铁工艺,但进一步增大了铸件与冒口之间的有效接触面积,以增加冒口补缩效率;此外,增加一条内浇道具有非常好的效果。模拟结果显示,原方案中1、2、4、5位置处缩松倾向得到很好解决,位置3处缺陷得到明显改善。所以,通过比较仿真模拟后得到的各方案缩孔、缩松分布图可以确定,方案三为最佳浇注方案。

2.4 方案三充型过程模拟

图6为方案三的速度场模拟,可以看到牵引支架的整个充型过程持续了约20 s,且可以看出金属液自0.8 s开始从内浇道进入型腔,见图6a;随后金属液继续充填型腔,进入侧板腔,见图6b;当液体充满底层后,随着金属液的继续流入,液面层逐渐平稳上升,且在上升的过程中保持平行于底面,见图6c、6d和6e;10.4 s时开始充填冒口,此时型腔中的氧化渣等一些杂质可以排到冒口中,见图6e和图6f。此外,在整个充型过程中,金属液流动平稳快速、无飞溅,没有形成易卷入气体的涡流现象^[8],这不仅有利于型腔中气体的排出,还可以有效防止气孔和夹渣等缺陷的出现,而且对型壁、型芯的冲刷作用也较小。

3 产品实际生产过程

3.1 试验过程

按照优化后的方案按一型2件的工艺布局进行模具

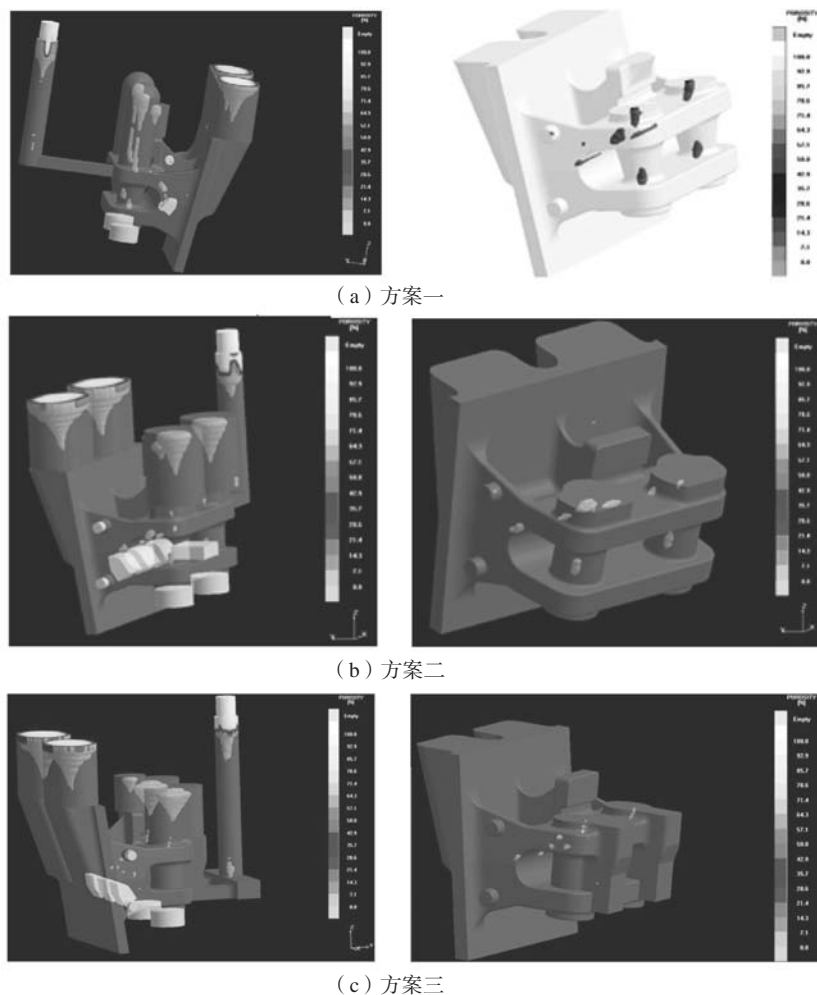


图5 不同工艺方案缩松缩孔分布云图

Fig. 5 Distribution nephogram of shrinkage and dispersed shrinkage of different process schemes

设计与制作, 对外模及芯盒尺寸进行测量后投入试制。

3.1.1 造型

采用酯硬化水玻璃石英砂造型, 制芯, 水玻璃加入量控制在2.3%~3.0%, 有机酯加入量占水玻璃量的15%~20%, 自硬化25~40 min后起模。砂芯及外模在起模后进行120~160 ℃预表干20~30 min, 表干后对外模、砂芯均刷涂醇基锆英粉涂料1遍, 涂料波美度控制在 63 ± 3 , 点火干燥后备用。清理砂型表面的浮砂及涂料淤积后下芯, 下芯后上下铸型分别进表干炉实施终表干, 温度控制在150~180 ℃, 表干30 min左右, 出炉合箱浇注, 铸型如图7所示。

3.1.2 铸件熔炼浇注

采用中频感应电炉进行熔炼, 同时实施炉底吹氩脱氧工艺提升钢液的纯净度, 使用漏包浇注。牵引支架铸钢件平均壁厚为22 mm, 浇注速度控制在18~26 s,

初始浇注温度控制在1 570~1 580 ℃。

3.1.3 铸件后处理及检测

浇注8 h后开箱震动清砂, 并采用氧乙炔切割浇口、冒口, 然后进行清理打磨处理, 并进行磁粉探伤、射线探伤等检测, 均满足验收技术条件要求。对铸件进行调质热处理, 调质热处理工艺采用淬火油作为冷却介质。对铸件进行精加工, 并对加工面外观质量和磁粉探伤结果进行确认, 制得的产品符合验收技术条件要求。

3.2 试验结果

根据试制转量产控制要求, 共计完成47件牵引支架的小批量试制, 合格品45件, 合格率达到95.7%, 达到了预设95%的合格率指标。具体情况如下。

(1) 对牵引支架铸件进行X射线检测, 每件产品共计布片22处, 共计统计6件产品的射线探伤结果,

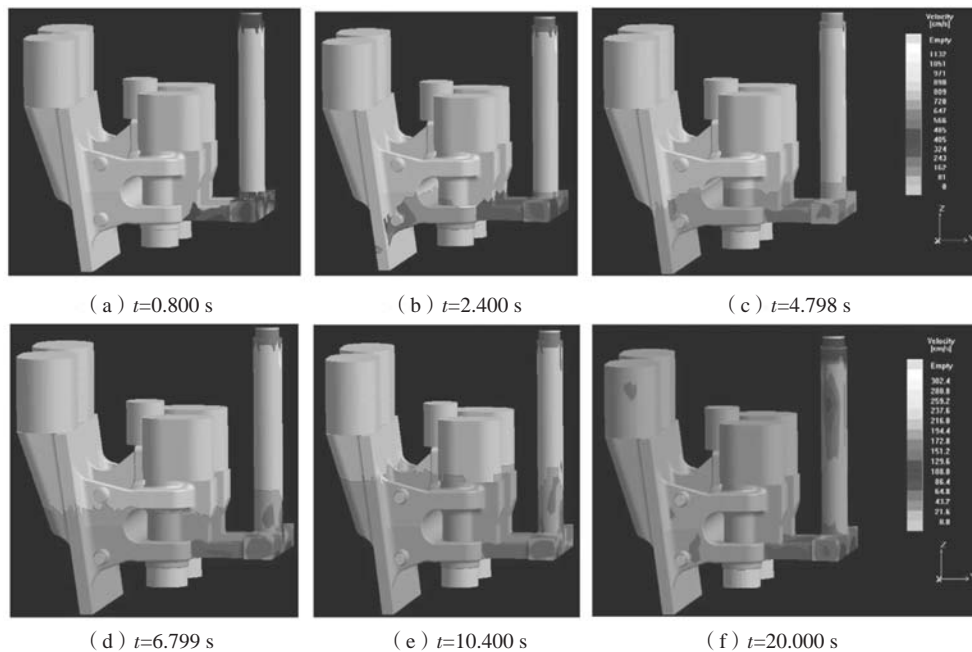


图6 改进方案三的速度场模拟

Fig. 6 Velocity field simulation of improved scheme 3

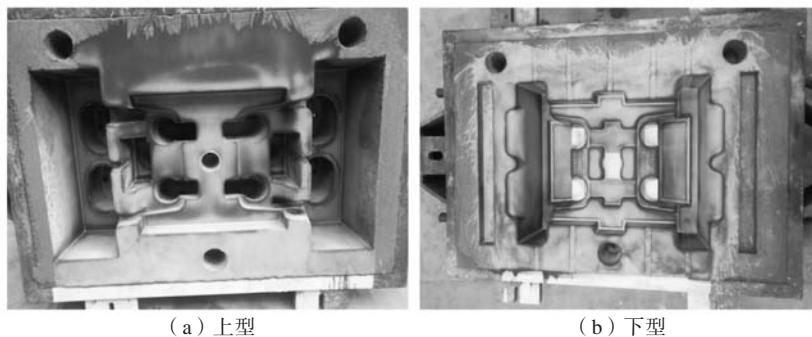


图7 牵引支架铸件的铸型

Fig. 7 Mould of traction bracket

实际射线探伤等级均为Ⅱ级及以上，Ⅰ级部位可达到81.3%以上，对于该种结构的薄壁件来讲，获得这样的致密度水平是超出工艺设计预期的。

(2) 基于良好的浇注系统设计，钢液充型平稳，气和渣从冒口区域上浮充分，铸件毛坯外观质量一致性良好，毛坯面平整光洁，经抛丸处理后铸件表面粗糙度可达到 $R_a 30 \mu\text{m}$ 的水平，铸件精加工后表面无目视缺陷，加工面磁粉探伤等级达到LM1/AM1~SM1水平。铸件外观质量见图8。

(3) 铸件调质热处理后，按图纸规定的部位实物取样按照GB/T 229 进行冲击试验检测，检测结果满足标准要求，-40℃低温冲击平均值大于46 J，较27 J标准值有70.3%的富余量。

(4) 小批量试制过程中报废的2件牵引支架铸件，均为最终加工后在关键加工面出现了夹砂缺陷，导致产品报废。分析报废原因为砂型局部紧实度不足或修补不当，在钢液浇注冲刷过程中砂型破损，散落的型砂带来关键加工面的夹砂缺陷。

4 结束语

(1) 本文针对高速列车转向架的核心零部件牵引



图8 牵引支架铸件实物
Fig. 8 Traction bracket casting

支架设计了三种铸造工艺方案，并运用模拟软件进行了仿真分析，通过仿真结果预判了缩孔、缩松缺陷出现的位置并分析了形成的原因，通过改进，确定了最优工艺方案。

(2) 在实际试验过程中，基于前期MAGMA soft 模拟推演过程中的参数，操作按照工艺要求进行，使试验结果能够达到工艺参数的要求，最终获得了内外部质量均符合技术要求的铸件。

参考文献:

- [1] 赵娅. 发动机曲轴铸造缺陷的原因分析与优化 [J]. 热加工工艺, 2016 (8): 247-249.
- [2] 吴龙, 高浩, 艾子健. 气缸套离心铸造凝固数值模拟研究 [J]. 铸造, 2014, 63 (12): 1241-1244.
- [3] 周建新. 铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势 [J]. 铸造, 2012, 61 (10): 1105-1115.
- [4] 李响. 发动机缸盖铸造成型仿真及工艺优化 [D]. 北京: 北京理工大学, 2001.
- [5] 黄任杰, 侯击波, 刘云, 等. 基于MAGMAsoft的连接支架铸铝件铸造工艺设计 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (23): 43-45.
- [6] 王丽萍, 孙长波, 高成薇, 等. 支架类铸件熔模铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (6): 528-530.
- [7] 文波, 夏志单, 季珊林, 等. 复杂薄壁框类铝合金铸件工艺设计及数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (7): 768-771.
- [8] 潘东杰, 何芝梅, 夏小江, 等. 铁型覆砂铸造工艺在汽车轮边减速器壳体生产上的应用 [J]. 铸造, 2014, 63 (2): 162-165.

Casting Process Optimization of Traction Bracket for High-Speed Train

SHI Dong-li¹, CAO Song², ZHU Yu¹, SHAO Zong-hui¹

(1. Institute of Mechanical Engineering, Changzhou Institute of Mechatronic Technology, Changzhou 213164, Jiangsu, China; 2. CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:

In this paper, the casting process of the traction component of the core component of the high-speed train bogie is explored. By using the casting numerical simulation software MAGMAsoft, the filling and solidification process of the designed casting process was simulated, and the positions of shrinkage and dispersed shrinkage defects were predicted. Three improved process schemes are proposed for the defects. After analysis and comparison, the scientific and reasonable casting process plan of the traction bracket is finally determined, which can provide technical guidance for actual production.

Key words:

traction bracket; numerical simulation; casting process design; solidification and simulation