

重型商用车平衡轴支架铁型覆砂铸造工艺设计与优化

白红¹, 冀元贵², 罗铖², 吴孟武^{1, 3}

(1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北武汉 430070;
2. 湖北星源科技有限公司, 湖北十堰 442000; 3. 湖北隆中实验室, 湖北襄阳 441022)

摘要: 以某重型商用车平衡轴支架为研究对象, 根据平衡轴支架的结构特点与质量要求, 初步设计了平衡轴支架的铁型覆砂铸造工艺方案并进行样件试制。样件剖切结果发现在平衡轴根部厚大区域出现了较为严重的缩孔缩松缺陷。利用AnyCasting软件对平衡轴支架铸件的充型与凝固过程进行模拟仿真, 仿真结果预测的铸件缩孔缩松位置与实际情况相一致。基于平衡轴支架充型与凝固过程及铸件缺陷产生原因的分析, 对初始铸造工艺方案进行优化。优化后的仿真结果显示平衡轴支架铸件的缩孔缩松缺陷已基本消除。根据优化后的铸造工艺方案再次进行样件试制, 样件剖切结果表明原平衡轴根部厚大区域的缩孔缩松缺陷已完全消除, 平衡轴支架铸件内部质量满足要求。

关键词: 平衡轴支架; 铁型覆砂铸造; 数值模拟; 工艺优化

作者简介:

白红(1999-), 男, 硕士生, 研究方向为汽车轻量化设计及成形制造技术。电话: 027-87858200, E-mail: bhms@whut.edu.cn

通讯作者:

吴孟武, 男, 副教授, 博士, 博士生导师。电话: 027-87858200, E-mail: wumw@whut.edu.cn

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

03-0396-07

基金项目:

湖北省重点研发计划资助项目(2021BAA048); 湖北省重点研发计划资助项目(2022BAD100)。

收稿日期:

2023-06-20 收到初稿,
2023-12-09 收到修订稿。

平衡轴支架作为重型商用车平衡悬架的重要部件之一, 其连接板簧和车架并传递之间的作用力。重型商用车在行驶过程中工况复杂, 对平衡轴支架的结构强度要求较高, 其直接影响商用车的行驶安全性^[1-3], 因此, 在开发平衡轴支架产品时, 不仅要从功能方面考虑结构设计的合理性, 良好的制造工艺性也是在产品设计时必须要考虑的因素, 如此才能保证平衡轴支架的质量要求。

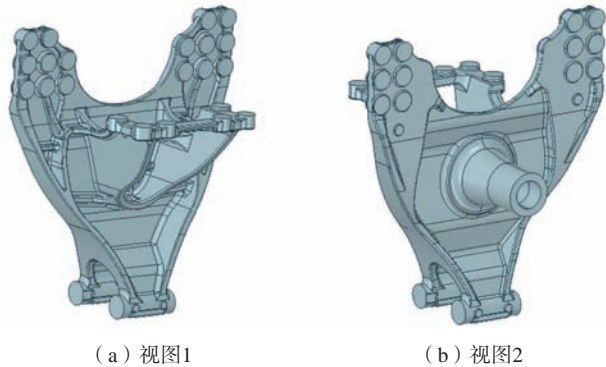
铁型覆砂铸造工艺是一项同时结合金属型铸造和壳型铸造优点的工艺方法, 该工艺在铁型内腔和模样之间保持6~10 mm的间隙, 将覆膜砂射入并填满间隙, 使覆膜砂在一定的温度下固化, 此时覆膜砂紧紧覆在铁型的内腔, 从而获得铸造所需要的型腔, 使用该型腔进行浇注得到铸件^[4-9]。由于外部铸型是厚度较大的铁型, 铁型的存在使得铸造过程的散热速率得到较大的提高, 从而可以细化铸件晶粒组织、提升铸件力学性能。同时, 铁型覆砂铸造工艺可以根据铸件的结构控制覆砂层的厚度, 以实现顺序凝固, 降低产生铸造缺陷的概率^[10-18]。然而, 重型商用车平衡轴支架结构复杂, 铸件内部质量要求较高, 其铁型覆砂铸造工艺设计难度较大, 鲜有相关研究报道。

本文根据某重型商用车平衡轴支架的结构特点与质量要求, 初步设计了其铁型覆砂铸造工艺方案, 并进行样件试制, 借助AnyCasting软件对平衡轴支架充型和凝固过程进行数值模拟分析。在试制结果及模拟仿真的基础上, 对平衡轴支架铁型覆砂铸造工艺进行优化改进, 并进一步开展仿真与试制验证工作, 以期对同类铸件产品的铁型覆砂铸造工艺设计提供一定的参考借鉴。

1 工艺方案设计

1.1 铸件分析

图1为某重型商用车平衡轴支架的结构图, 轮廓尺寸为536 mm × 412 mm × 576 mm, 单件平衡轴支架重46.17 kg, 壁厚不均匀, 局部最大厚度到达47 mm, 位于平衡轴



(a) 视图1

(b) 视图2

图1 某重型商用车平衡轴支架

Fig. 1 Balance shaft bracket of a heavy commercial vehicle

根部,是主要受力的部位。铸件外观要求:无明显的流痕与裂纹,表面不能有气泡;铸件力学性能要求:抗拉强度 ≥ 800 MPa,屈服强度 ≥ 480 MPa,伸长率 $\geq 5\%$;同时要确保平衡轴支架铸件主要传力部位平衡轴根部不能出现缩孔缩松缺陷。

该平衡轴支架相比同类产品轻量化程度显著提高,所以对材质要求也较高。选用高牌号的球墨铸铁QT800-5,其具有高强度、高伸长率的优点,材料基体组织中的铁素体和珠光体的比例会影响材料的强度和伸长率,需要确保珠光体和铁素体的比例在合适的范围内^[19-20]。QT800-5材料的化学成分如表1所示。

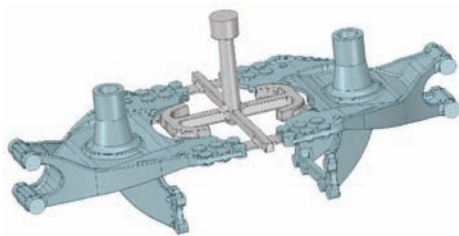
表1 QT800-5化学成分
Table 1 Chemical composition of QT800-5

C	Si	Mn	Cu	Mg	S	P	RE	Sn	Fe	$w_B/\%$
3.65~3.75	2.6~2.75	0.4~0.5	0.4~0.5	0.035~0.045	≤ 0.03	≤ 0.05	0.01~0.03	0.01~0.02	余量	

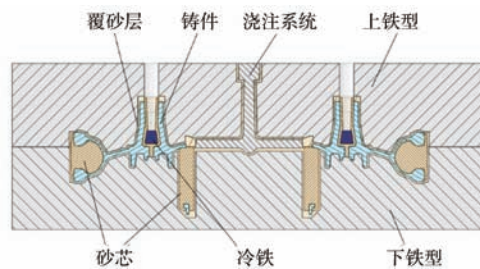
1.2 铸造工艺方案初步设计

采用铁型覆砂铸造工艺,根据平衡轴支架的结构特点及力学性能要求,并结合实际生产过程,确保平衡轴支架内部不出现缩孔缩松缺陷是铸造工艺方案设计的关键。初步设计铸造工艺方案如下:将平衡轴竖直摆放,保持铸件最大投影面处于水平状态,如此

可以保证平衡轴根部的质量;采用侧注式浇注,一箱两件;平衡轴根部比较厚大,该部位容易出现热节,所以在平衡轴根部安放冷铁;外铁型初始温度为 $180\sim 220$ °C,覆砂层初始温度为 $70\sim 90$ °C,浇注温度为 $1410\sim 1420$ °C,浇注速度为 30 cm/s,浇注半径为 30 mm,初步设计的铸造工艺方案如图2所示。



(a) 初始铸造工艺方案



(b) 铁型覆砂结构示意图

图2 初始铸造工艺方案及铁型覆砂结构示意图

Fig. 2 Preliminary design of casting process scheme and sand-lined metal mould structure diagram

1.3 样件试制

根据初始铸造工艺方案进行样件试制,样件表面质量良好,将铸件进行初步加工,然后装配到台架试验机进行台架试验,结果在台架试验过程中平衡轴根部首先发生了断裂,平衡轴支架疲劳寿命没有达到最低标准。将平衡轴支架铸件进行解剖,发现在平衡轴的根部厚大部位存在严重的缩孔缩松缺陷,如图3所示。

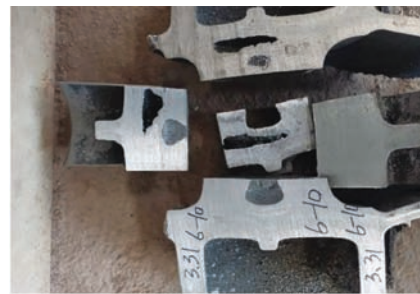


图3 平衡轴根部出现的较大缩孔缩松缺陷

Fig. 3 Large shrinkage and porosities at the root of balance shaft

2 平衡轴支架铁型覆砂铸造工艺模拟仿真

为了找出平衡轴支架铸件根部出现严重缩孔缩松缺陷的原因,借助AnyCasting软件对平衡轴支架初始工艺方案的充型及凝固过程进行仿真分析。在AnyCasting软件前处理模块AnyPRE中,铸造工艺选用砂型铸造,将覆砂层设为模具,而铁型作为冷铁设置为附属物。设置外铁型的初始温度为200℃,覆砂层初始温度为80℃。

2.1 充型过程

图4所示为模拟得到的初始铸造工艺方案下平衡轴支架的充型过程,从充型过程可以看出,金属液通过浇口杯进入直浇道,然后进入横浇道,最后通过几个内浇道进入铸件型腔,金属液由平衡轴支架两侧流向铸件型腔的下部,由下向上逐渐充满整个铸件型腔,金属液最后到达的位置是平衡轴的端部,整个充型过程平稳有序,未出现严重的金属液飞溅的情况,充型时间为21.47 s。

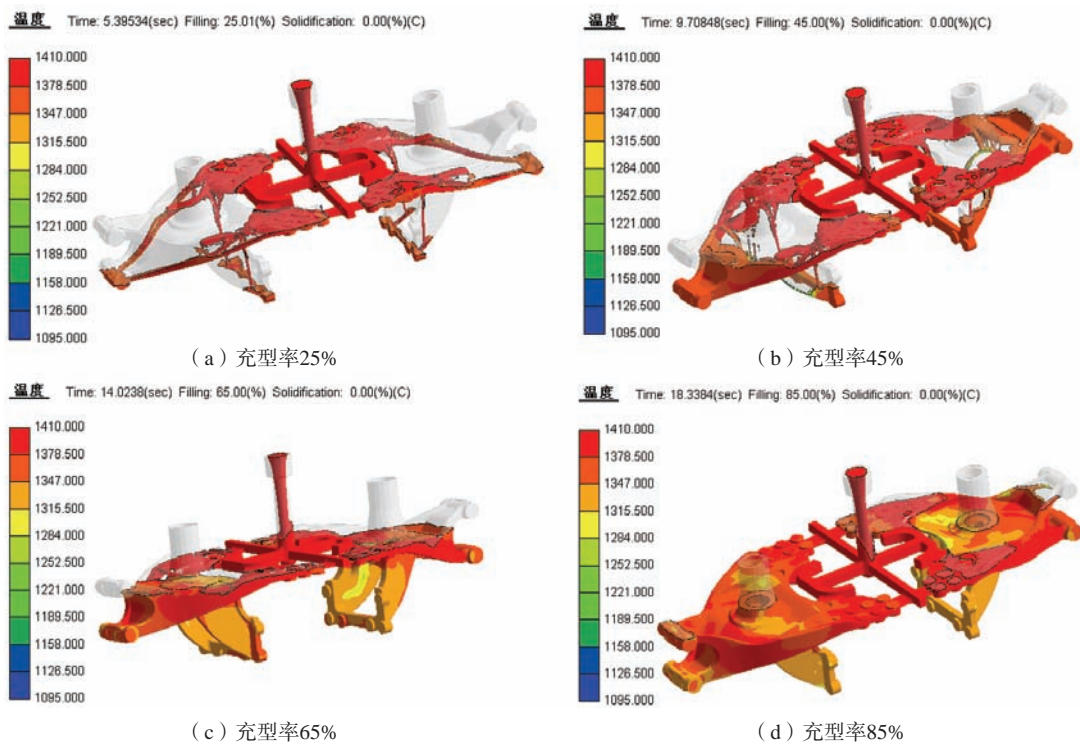


图4 初始工艺方案的充型过程
Fig. 4 Filling process of initial scheme

2.2 凝固过程

图5为模拟得到的初始铸造工艺方案下平衡轴支架的凝固过程,其中灰色阴影表示已经凝固的区域,有颜色的区域表示未凝固区域。如图5a所示,当凝固74.4 s时,铸件尺寸较小的薄壁肋板位置已经部分凝固。当凝固时间达到263.9 s时,平衡轴支架下部较薄位置已经完全凝固(图5b),螺栓孔位置厚度较大,所以还有部分铁液未凝固,同时铸件从四周向平衡轴根部凝固。当凝固时间到352.6 s时,横浇道全部凝固,此时直浇道给铸件补缩的通道已经凝固,直浇道的补缩作用已失效,如图5c所示。随着温度的继续降低,铸件的大部分区域已经凝固,当凝固时间到435.5 s时,在平衡轴的根部、支架的两侧螺栓孔及下推力杆安装位

置还有金属液未凝固,出现孤立液相区,这几个位置由于没有了铁液补缩极易出现缩孔缩松缺陷,如图5d所示。

2.3 铸件缩孔缩松缺陷预测

由铸件的凝固过程可以看出,在平衡轴根部的厚大区域存在较大的孤立液相区,由于得不到铁液补缩,因此可能产生缩孔缩松缺陷。利用残余熔体模数法对平衡轴支架铸件可能出现的缺陷进行预测,平衡轴支架铸件根部出现缺陷处的典型截面如图6所示。从缺陷预测结果可以看出,平衡轴根部的厚大区域在凝固过程中会产生明显的缩孔缩松缺陷,与试制铸件实际出现缺陷的位置相一致。为了改善平衡轴支架的

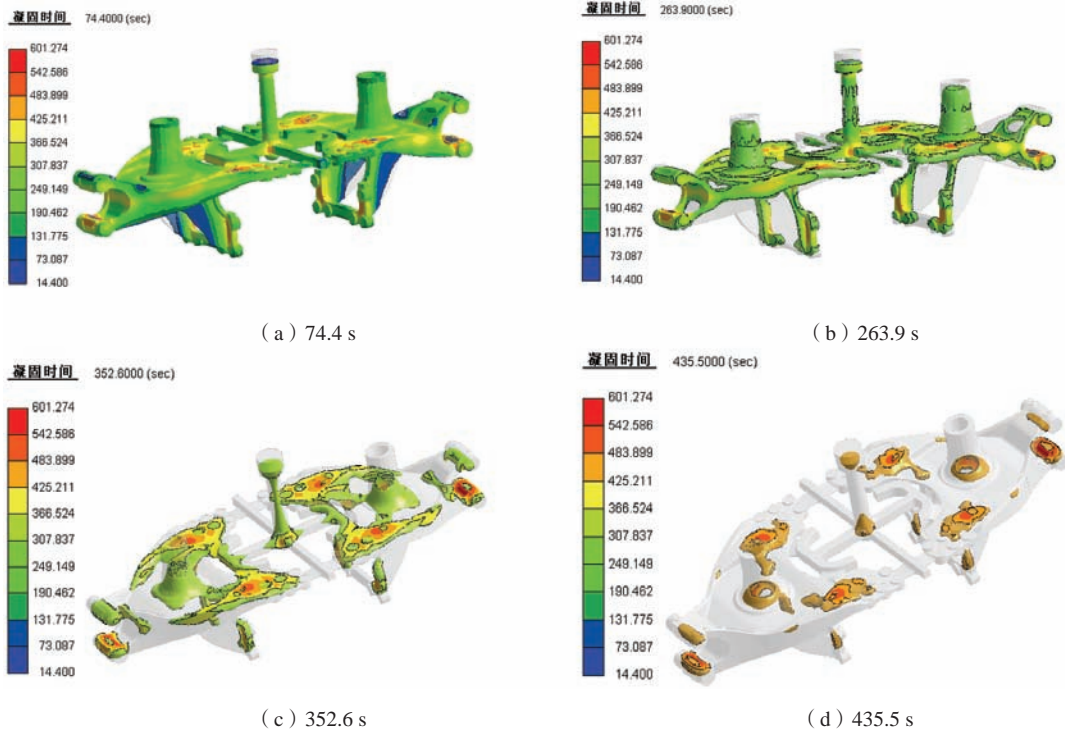


图5 初始工艺方案的凝固过程
Fig. 5 Solidification process of initial scheme



图6 铸件缺陷预测结果
Fig. 6 Prediction results of casting defects

铸造成形质量，需对其初始铸造工艺方案进行改进优化。

3 铸造工艺优化

3.1 工艺优化方案

由于该平衡轴支架整体壁厚变化较大，厚度较大的区域与周围薄壁结构连接，所以在凝固过程中补缩通道容易被切断，铸件产生缩孔缩松的概率较大，这是该平衡轴支架根部产生缩孔缩松缺陷的原因。结合样件试制及模拟仿真中铸件出现的缺陷情况，对原工艺方案进行优化，在平衡轴根部厚大位置增设冒口，利用冒口来进行补缩。同时由于铸件的下部分距离内浇口的垂直距离较长，充型过程中金属液对铸件下方

型腔有一定的冲击力，针对该问题在铸件的下部增设一个内浇口，缓冲金属液垂直下落产生的冲击力，减少对覆砂层的冲击。同时，增加的内浇口还可以为平衡轴支架两侧螺栓孔提供补缩通道。工艺优化后的浇注系统如图7所示。

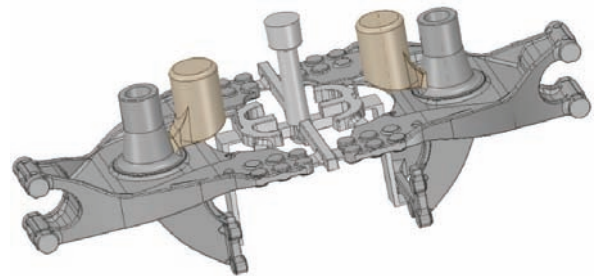


图7 优化后的铸造工艺方案
Fig. 7 Optimized casting process scheme

3.2 模拟仿真及试制结果

工艺方案优化后的铸件充型过程模拟结果如图8所示，由于优化后的铸造工艺方案在铸件下部增加了一个内浇口，金属液可通过新增加的内浇口直接进入型腔下部，之后铸件上部的金属液也逐渐流入铸件型腔的下部，此时铸件的下部已有一些金属液，减小了充型落差，防止了垂直下落的金属液对覆砂层的冲击，如图8a所示。随着充型时间的增加，金属液由下向上

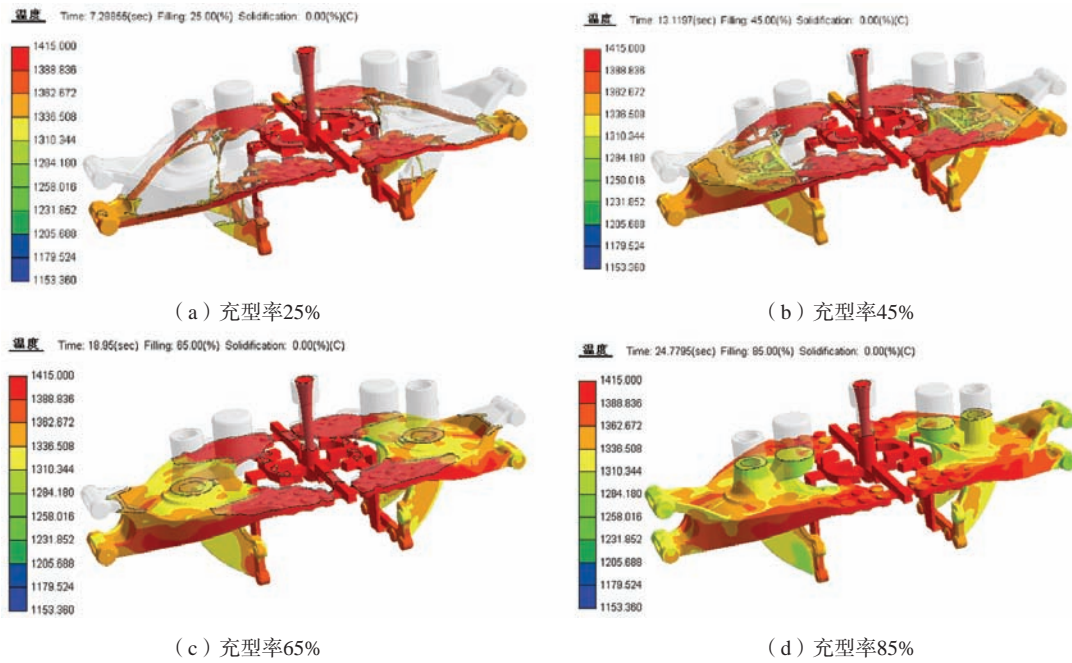


图8 优化工艺方案的充型过程
Fig. 8 Filling process of optimized scheme

充满了铸件型腔的下部，未出现金属液溅射的情况，如图8b所示。随后，金属液充满了铸件的最大截面位置，此时金属液液面已经趋于平稳，如图8c所示。当充型率达85%时，铸件的型腔大部分已经充满了金属液（见图8d），液面继续充填到冒口和平衡轴处，最终

完成全部充型过程。整个充型过程效果良好，金属液由下到上充满整个型腔，与优化前的工艺方案相比，优化后的工艺方案中金属液充型过程平稳，对覆砂层的冲击也较小。

如图9所示为工艺方案优化后模拟得到的铸件凝固

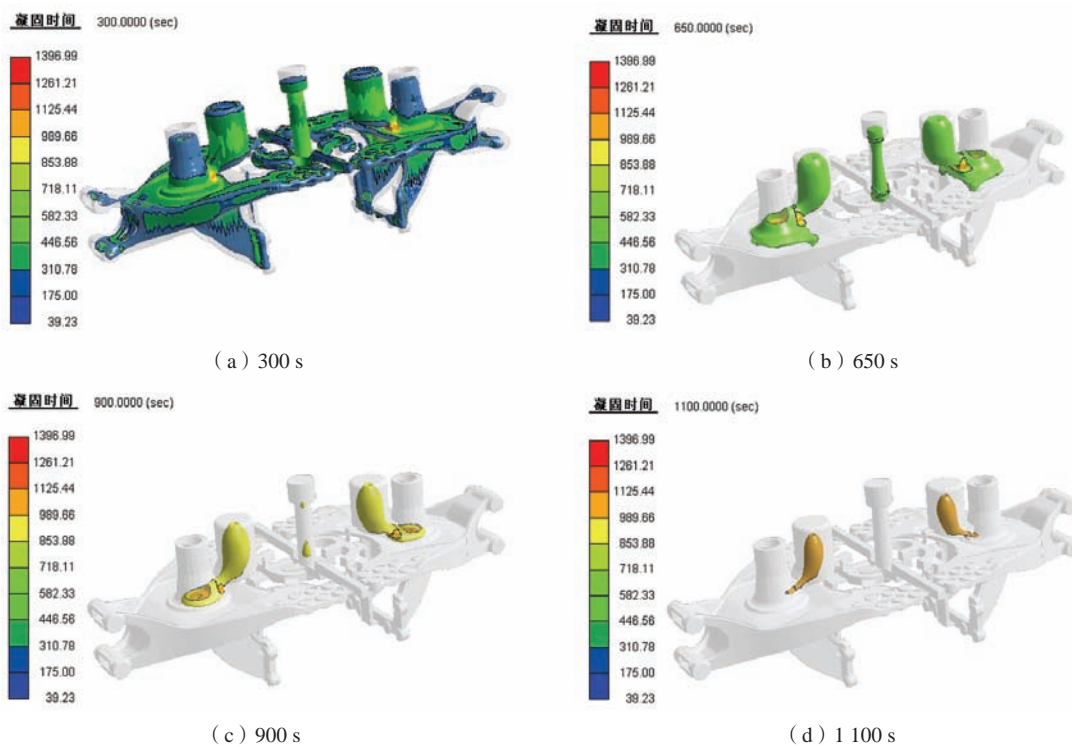


图9 优化工艺方案的凝固过程
Fig. 9 Solidification process of optimized scheme

过程,铸件凝固由表层开始,接着铸件的薄壁位置先凝固;随着温度的降低,铸件开始以平衡轴和冒口区域为中心向中间凝固。由于冒口的存在,平衡轴根部的金属液在完全凝固之前和冒口的金属液一直连通,冒口为平衡轴根部厚大区域提供了补缩通道,冒口区域最后凝固,因此减少了平衡轴根部出现缩孔缩松缺陷的概率。

图10所示为优化铸造工艺方案下的铸件缺陷预测

与试制样件的实际剖切结果对比情况,可以看到模拟仿真与试制结果均显示平衡轴根部的缩孔缩松缺陷已完全消除,也即铸件凝固过程中平衡轴根部先于冒口凝固,将缩孔缩松缺陷引入冒口中,从而保证了平衡轴支架铸件本体的内部质量。另外,整个铸件表面质量良好,符合生产工艺要求。通过对工艺方案优化后试制的平衡轴支架进行台架试验,平衡轴支架在达到疲劳寿命要求之前没有发生破坏,符合使用要求。

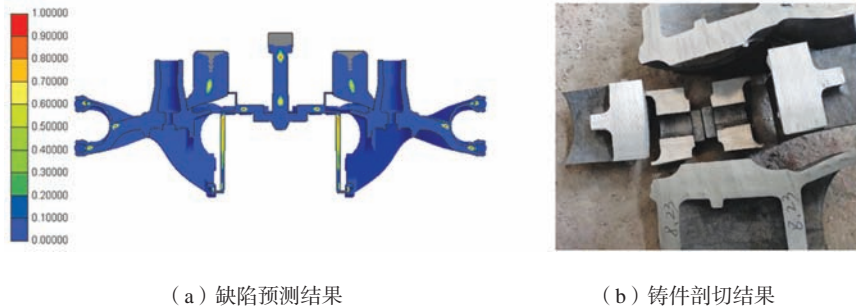


图10 优化铸造工艺方案下的铸件缺陷预测与实际剖切结果

Fig. 10 Comparison between defect prediction and actual cutting results of casting under optimized process scheme

4 结论

(1) 由平衡轴支架初始铸造工艺方案试制得到的样件在平衡轴根部出现较大的缩孔缩松缺陷,该原因为平衡轴根部的厚大区域凝固较慢,出现了孤立液相区,没有铁液对其补缩导致的。

(2) 在平衡轴支架初始铸造工艺方案的基础上进行改进,优化措施包括在平衡轴根部增设冒口进行

补缩,使得平衡轴根部先于冒口部分凝固,其次在铸件的下部增加一个内浇口,减少金属液对覆砂层的冲击。

(3) 平衡轴支架优化铸造工艺方案下的仿真与试制结果均表明,平衡轴根部的缩孔缩松缺陷已完全消除,铸件表面及内部质量良好,符合平衡轴支架铸件的生产要求。

参考文献:

- [1] 王焕美. 基于某重型车的平衡悬架结构优化设计 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [2] 靳建龙. 重型牵引车平衡悬架系统设计及平顺性分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [3] 冯国雨. 商用车推力杆性能优化与疲劳寿命预测研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [4] 赵忠魁, 李希石, 李庆松, 等. 铁型覆砂铸造技术应用进展 [J]. 中国铸造装备与技术, 2021, 56(6): 22-27.
- [5] 李可丹, 刘松奇, 王瑞金, 等. 耐热钢排气歧管铁型覆砂铸造工艺 [J]. 铸造, 2020, 69(9): 948-951.
- [6] 贺焱, 刘春溪, 王辉, 等. 球铁驱动架铁型覆砂铸造工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48(19): 79-82.
- [7] 李希石, 李长龙, 相士强. 铁型覆砂在高端铸件上的实践 [J]. 铸造技术, 2019, 40(8): 813-815.
- [8] 刘同帮, 沈永华. 铁型覆砂铸造在耐磨铸件领域的应用 [J]. 铸造, 2015, 64(8): 731-734.
- [9] 王旭东, 黄健强. 铁型覆砂球墨铸铁曲轴夹渣缺陷原因分析及措施 [J]. 铸造设备与工艺, 2021(5): 48-51.
- [10] 潘东杰, 朱国, 夏小江, 等. 铁型覆砂铸造电梯球铁制制动轮的生产应用 [J]. 铸造技术, 2019, 40(9): 961-964.
- [11] 赵晓林, 余让刚, 陈传涛. 厚大复杂球墨铸铁件的铁模覆砂工艺探讨 [J]. 铸造设备与工艺, 2019(4): 20-25.
- [12] 夏小江, 潘东杰, 刘同帮, 等. 汽车桥壳铁型覆砂铸造 [J]. 铸造技术, 2017, 38(11): 2781-2784.
- [13] 朱丹, 姜加学, 潘东杰, 等. 铁型覆砂铸造工艺生产牵引电机端盖的实践 [J]. 铸造, 2018, 67(8): 737-739.
- [14] 房文亮, 王仲珏, 周道宏, 等. 基于AnyCasting的铁型覆砂铸造工艺仿真设计应用 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(7): 119-121.
- [15] 夏小江. 铁型覆砂铸造球墨铸铁件缩孔缩松的防止 [J]. 铸造, 2020, 69(2): 187-190.
- [16] 马益诚, 黄列群, 沈永华, 等. 铁型覆砂铸造前悬架的凝固模拟及工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(13): 54-55.

- [17] 张春明. 球铁飞轮的铁型覆砂铸造生产及缺陷防止 [J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32 (10) : 943-945.
- [18] 朱国. 铁型覆砂铸造在泵阀件毛坯生产中的应用 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [19] 高峰, 武炳焕. QT800-5轻量化平衡轴支架的开发 [J]. 现代铸铁, 2020, 40 (1) : 13-17+21-22.
- [20] 张军, 汪金飞, 郑言彪, 等. 铸态QT800-5悬挂支架铸件的研制 [J]. 现代铸铁, 2016, 36 (5) : 28-30.

Design and Optimization of Sand-Lined Metal Mold Casting Process for Balance Shaft Bracket of a Heavy Commercial Vehicle

BAI Hong¹, JI Yuan-gui², LUO Cheng², WU Meng-wu^{1,3}

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. Hubei Xingyuan Technology Co., Ltd., Shiyan 442000, Hubei, China; 3. Hubei Longzhong Laboratory, Xiangyang 441022, Hubei, China)

Abstract:

Taking the balance shaft bracket of a heavy commercial vehicle as the research object, based on the structural characteristics and quality requirements of the balance shaft bracket, the sand-lined metal mold casting process scheme of the balance shaft bracket was preliminarily designed and the sample was trial produced. The cutting results of the sample revealed severe shrinkage and porosity defects in the thick area at the root of the balance shaft. The filling and solidification process of the balance shaft bracket casting was simulated using AnyCasting software, and the predicted shrinkage and porosity positions of the casting were consistent with the actual situation. Based on the analysis of the filling and solidification process of the balance shaft bracket and the causes of casting defects, the initial casting process scheme was optimized. The simulation results of the optimized process scheme showed that the shrinkage and porosity defects of the balance shaft bracket casting have been basically eliminated. According to the optimized casting process scheme, a trial production of the sample was conducted again. The cutting results of the sample showed that the shrinkage and porosity defects in the thick area at the root of the original balance shaft have been completely eliminated, and the internal quality of the balance shaft bracket casting met the requirements.

Key words:

balance shaft bracket; sand-lined metal mold casting process; numerical simulation; process optimization
