DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.12.011

优化大型工程车桥用轮毂工艺消除缩孔缺陷

张俊涛,侯东亮,胡海燕,王小强
(长葛市富兴汽配有限公司,河南 许昌 461500)

摘　要:针对一种 45 t 工程车桥用轮毂,采用湿型潮模砂的铸造生产方法,针对产品存在缩孔问题,应用 MAGMA 软件对铸造补缩工艺设计进行模拟分析计算,通过对残余液相分布和缩孔判据来分析补缩工艺设计是否满足铸件内部品质要求,并基于实际生产条件制定补缩工艺优化方案,对优化后工艺进行仿真模拟和实际生产验证,最终获得了致密的轮毂铸件。

关键词:45 t 工程车桥;轮毂;缩孔;MAGMA;优化;致密

中图分类号: TG245　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)12-1147-04

Optimizing Process to Eliminate Shrinkage Defects for Large Engineering Vehicle

ZHANG Juntao, HOU Dongliang, HU Haiyan, WANG Xiaoqiang
(Chang Ge Fuxing Casting Co., Ltd., Xuchang 461500, China)

Abstract: For a kind of wheel hub for 45T engineering vehicle, the MAGMA software was used to simulate, analyze and calculate the foundry shrinkage problem of the product by using the foundry production method of wet type tidal sand. Based on the actual production conditions, the optimization scheme of the feeding process was developed, and the simulation and actual production verification of the optimized process were carried out. The results show that by analyzing the residual liquid distribution and shrinkage criterion, the filling process design could meet the internal quality requirements of the casting, and the compact hub casting is finally obtained.

Key words: 45 t engineering vehicles; hub; shrinkage porosity; optimization; density

轮毂是工程车底盘的重要零部件之一,是车辆安保件;作为旋转零部件,轮毂需要有足够的刚度和强度性能, 同时要求有良好的耐疲劳和散热性;轮毂的材质一般为球墨铸铁,球墨铸铁的凝固方式为糊状凝固,虽然在凝固过程中石墨的析出将带来一定的体积膨胀,但收缩缺陷仍旧是球铁件最为常见的缺陷;为了确保轮毂铸件的使用安全性,必须获得致密的轮毂铸件,以确保产品设计的有效承载面积。

借助于铸造 CAE 技术将铸造充型、凝固过程可视化,并通过 CAE 软件的计算分析,不仅可对设计工艺存在的问题和结果进行预判,还可以辅助确认优化工艺是否能够达到预期效果。

1　轮毂铸件技术要求及生产条件

轮毂是 45 t 大型工程车桥用,产品结构如图 1,

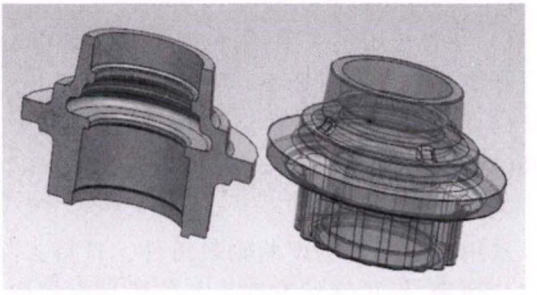

图 1 工程车桥用轮毂三维结构示意图
Fig.1 Schematic 3D structure of hub for large engineering vehicle

轮廓尺寸 ϕ482 mm×275 mm, 铸件单重为 89.7 kg, 铸件模数 Mc=1.65 cm, 热节位置节圆直径 54 mm, 质量周界商 19.71 kg/cm^3。

(1)技术要求　材质性能要求为 QT550-6,铸件不允许有存在影响使用性能的夹渣、气孔等缺陷,产品截面致密度要求满足 ASTM E446 CC3。

(2)生产条件　该产品在我司有箱静压造型线生产,砂型硬度平面可达 90~95(B 型硬度计),有效砂箱尺寸为 1 000 mm×850 mm×220/300 mm,半自动浇注机浇注,5 套 1.2 t 中频感应电炉,砂芯为覆膜砂机器制芯,采用喂线法球化工艺,孕育工艺采用包内孕育、转包孕育+浇注随流。

收稿日期:2020-09-15
作者简介:张俊涛(1985-),河南许昌人,中级工程师,主要从事铸造工艺设计方面的工作.电话:18790388930,
E-mail:18790388930@126.com

2 原工艺介绍及存在问题

该产品结构与常规轮毂相近，主要由连接法兰、筒体两部分组成，主要壁厚为 45 mm，重量是常规重卡轮毂的 2.0~2.5 倍，热节相对集中，补缩需求量大。

2.1 原工艺介绍

该轮毂浇冒系统工艺设计如下图 2，由于型板尺寸受限，工艺布局一型 2 件，采用 4 只 ϕ110 mm×190 mm 热冒口补缩，冒口为热暗冒口，冒口颈设置在轮毂最大截面法兰盘，冒口与铸件距离 20 mm。

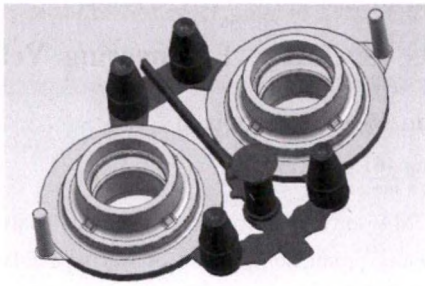

图 2 原浇冒系统工艺布局 3D 图
Fig.2 Original pouring and feeding system

(1) 炉料配比工艺采用生铁 60%+ 废钢 10% +30%回炉料，化学成分要求如下表 1。

(2)炉前成分合格后进行过热处理，过热温度 1 520~1 540 ℃，过热时间 8~10 min。

(3)孕育采用多次孕育，包内孕育 75Si-Fe，转包孕育和浇注随流采用 Si-Ba-Ca 复合孕育剂。

(4)浇注采用半自动浇注机，浇注温度1 350~1 380 ℃。

2.2 存在问题

采用现有工艺生产的轮毂铸件，冒口去除后，冒口颈致密，经过剖切发现热节位置存在较为严重的缩孔缺陷，如图 3 所示，缺陷主要集中分布在侧冒口附近区域；观察缺陷形貌，如图 4，可明显观察到孔壁粗糙，存在树枝状组织，是典型的缩孔特征形貌。

3 形成缩孔缺陷的原因分析

由于轮毂产品的材质为球墨铸铁，球墨铸铁具有典型的糊状凝固特性，结晶过程会产生大量树枝晶组织。液态金属在具有一定过热度的前提下充满铸型型腔，随着冷却过程中逐步降温，收缩大致经

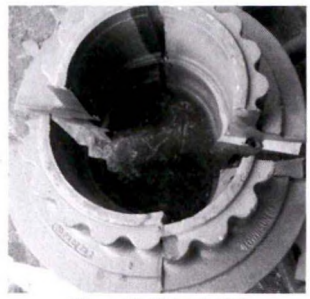

图 3 铸件解剖图
Fig.3 The section of hub casting

图 4 缺陷形貌
Fig.4 Shrinkage defect on the sectioned hub casting

历 3 个阶段：液态收缩、凝固收缩、固态收缩，集中性的缩孔缺陷主要产生在液态收缩和凝固收缩阶段；尽管造成铸件产生收缩缺陷的因素很多，但针对球铁件轮毂个案，也应该具体问题具体分析。通过试制过程的跟踪分析如下。

3.1 化学成分

CE：在相同过热度条件下，球墨铸铁的铁液流动性主要与碳当量有关，成分越接近共晶成分，铁液的流动性越好，金属液补缩流动阻力越小；另一方面，CE 越高，共晶阶段石墨析出量越多，可利用自补缩的共晶膨胀量越大。

稀土和镁：稀土残余量过高会恶化石墨形状，降低球化率；镁是强烈稳定碳化物的元素，阻碍石墨化，因此残余镁和稀土含量在满足球化的前提下不宜过高，过高会增加缩孔、缩松倾向。

通过试制过程的跟踪，炉前化学成分检测满足要求后，才能出炉进行喂线球化，因此化学成分在要求的控制范围内，不是该产品产生缩孔缺陷的主要原因。

3.2 浇注温度

在一定的条件下浇注温度越高，虽然铁液的流动性有所增加，会减小金属液补缩流动阻力，但其使液态收缩量增加占据主导作用，因此浇注温度应该

表 1 化学成分要求
Tab.1 Chemical composition of cast iron of Hub

元素名称	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Sn	$Mg_{残}$
含量(%)	3.6~3.8	2.4~2.6	0.4~0.5	≤0.03	≤0.02	≤0.05	0.5~0.6	0.025~0.030	0.045~0.055

根据铸件结构特点控制在合适的范围；该产品的主要结构壁厚 22~45 mm，浇注温度在 1 350~1 380 ℃的范围合适，实际浇注温度基本介于 1 350~1 370 ℃，因此浇注温度不是该轮毂铸件产生缩孔的主要原因；

3.3 铸型硬度

该产品在有箱静压线生产，属于高密度机器造型，砂型硬度可达 90~95（B 型硬度计），实际检测发现硬度值介于 90~92，因此不存在因铸型刚度不足，造成型腔胀大从而使铸件产生缩孔缺陷。

3.4 补缩工艺设计不合理

该产品的补缩工艺设计如图 2，考虑到了轮毂直径较大，补缩距离远的实际情况，采用了 2 个热侧冒口，尽管普通砂冒口采用热冒口后的补缩效率得到了提升，但对于厚壁集中的环形件而言，补缩效率和补缩距离不能实现整个断面致密，无法满足该轮毂 ASTM E446 CC3 级的致密度要求，需要采用补缩效率和距离更高的补缩工艺措施，因此，补缩工艺设计不合理是该产品产生缩孔缺陷的主要原因。

4 优化方案及工艺仿真模拟

根据该产品缩孔产生的原因分析，认为该轮毂缩孔产生的主要原因是补缩工艺设计的补缩能力不足，结合公司实际生产条件和该产品的工艺布局情况，对原设计工艺的优化方案如下。

由于直浇道一侧布置，温度在该侧分布相对集中，为了确保液态补缩的效果，又不至于影响整个铸件的温度场分布，保留直浇道一侧的热侧冒口，采用 4 道分散内浇道引流，尽量减小圆周方向铸件的温度差，在侧冒口间隔基本 180°的远端，设计发热冒口补缩，铁液自型腔溢流进入发热冒口套内，利用发热冒口材料的放热反应维持冒口中金属液的持续高温状态；

为了避免发热冒口设置造成较大的接触热节，采用铸件均衡凝固技术的冒口设计原则，其位置离开热节又靠近热节，通过补贴和易隔片的设计，既确保了补缩通道的通畅，又便于冒口与铸件的分离。

根据补缩液量的需求，发热冒口套规格选择 100/130，冒口容积 800 mL，可利用金属液重量为 5.6 kg；冒口颈模数根据经验选择 $Mn=(0.7\sim0.8)Ms$，形状选择方形，冒口颈尺寸设计为 70 mm×36 mm。

工艺优化方案完成建模后，首先利用 MAGMA 软件对优化方案进行了凝固的模拟分析计算，在改进工艺方案下，铸件的不同进程残余液相分布和缩孔判据如下图 5~8。

通过图 5~7 残余液相分布来看，侧冒口完成液态补缩作用后，在残余液相剩余 30%时冒口颈凝固截断，冒口至热节的补缩通道中断；发热冒口在铸件整个凝固进程中，补缩通道始终保持通畅，在发热冒口燃烧放热作用下，使得冒口中始终存在可供补缩的液态金属，冒口–冒口颈–热节呈现正的模数梯

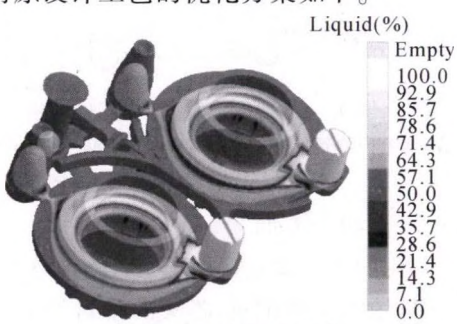

图 5 30%残余液相分布
Fig.5 30% Fraction Liquid

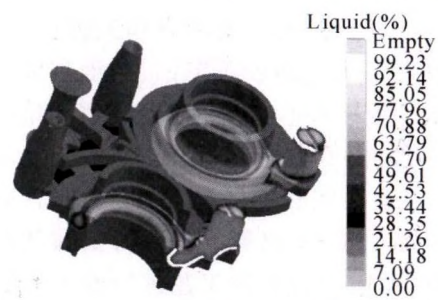

图 6 10%残余液相分布
Fig.6 10% Fraction Liquid

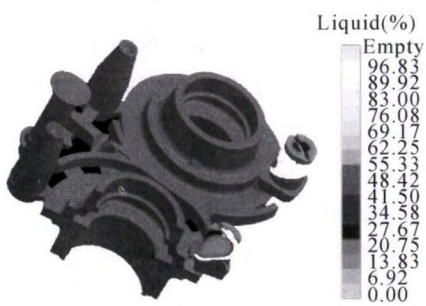

图 7 2%残余液相分布
Fig.7 2% Fraction Liquid

图 8 缩孔判据
Fig.8 The criteria of porosity

（下转第 1152 页）

温度梯度或凝固顺序下进行凝固成型，保证产品金相组织致密和性能的稳定性。

根据双耳管接头本体零件的结构特点，零件在机加工时，需保证零件壁厚均匀，中心线无偏差，砂芯结构优化改进后，铸件壁厚均匀，中心线无偏差，在机加工过程中，缩短机加工装夹调整时间，机加工时精准对刀，省去了多次对刀的过程，缩短工时，同时保证产品质量，结构优化后铸件尺寸如图 5 所示。

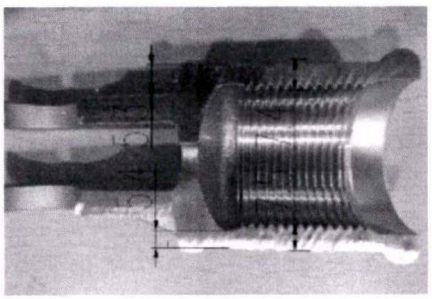

图 5 砂芯结构优化后生产的铸件
Fig.5 Casting made by Structure optimized core

3.2 探伤及机械性能测试

铸件探伤参照 GB/T 11346-2018《铝合金铸件射线照相检测-缺陷分级》，力学性能参照 GB/T 1173-2013《铸造铝合金》，在整个试制生产中无砂眼、缩松等铸造缺陷，铸件精度高，质量稳定，符合量产需求。

4 结论

砂芯芯头结构改进后，铸件壁厚均匀，中心线无偏差，双耳管接头的铸造合格率由 85%提高到现在的 98%。通过技术改进与创新，解决了在实际生产中存在的问题，提高了产品的品质与精度以及工作效率，减少甚至避免了不必要的返工次数，降低成本，实现良好的经济效益。

参考文献：

[1] 宁拥军. 液压铸件砂芯设计与铸件尺寸精度[J]. 铸造设备研究，2003, 2(4):43-50.
[2] 刘文川，李伟鹏. 铸件砂芯芯头的优化设计[J]. 铸造技术，1999(3):26-27.
[3] 李新亚，中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册(第 5 卷):铸造工艺[M]. 北京:机械工业出版社，2011.
[4] 白智渊. 导轮砂芯的结构改进 [J]. 铸造技术，2015, 36(7):1882-1887.
[5] 陈永龙，刘文川. 6110 气缸体铸造工艺的优化设计 [J]. 铸造技术，2012, 33(7):854-857.
[6] 彭显平，陈赓，蔺虹宾. WD615 缸体砂芯结构的优化设计[J]. 铸造，2014, 63(8):865-867.

(上接第 1146 页)

参考文献：

[1] 陈淑梅，潘全章，刘宝安. QT600-7 球墨铸铁材料的实验研究[J]. 铁道机动车辆，2009(29): 39-41.
[2] 张少华. 高强度铸铁(球墨铸铁)化学成分的选取[J]. 国外金属加工，2003(3): 29-31.
[3] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 1348-2009 球墨铸铁件[S]. 北京:中国标准出版社，2009.
[4] 吴德海. 球墨铸铁[M]. 北京:中国水利水电出版社，2006.
[5] 张军，汪金飞，郑言彪，等. 铸态 QT800-5 悬挂支架铸件的研制[J]. 现代铸造，2016(5): 28-30.

(上接第 1149 页)

度，即冒口颈、冒口凝固前铸件未形成孤立液相区；从铸件最终的凝固缩孔判据来看，铸件内部基本致密，不存在缩孔缺陷。

5 试生产验证

按照优化后工艺首先进行了 1 炉 4 箱的试制验证，冒口顶部可见明显的补缩收缩坑，冒口去除后，冒口颈致密，对铸件进行了“十字形”纵、横方向的切检，铸件内部致密。随后又进行了小批量 5 包的连续试生产验证，冒口去除后，冒口颈致密，目前具备批量供货能力。

6 结语

球墨铸铁轮毂因其糊状凝固特性，铁液自身的收缩倾向较大，石墨化膨胀自补缩利用程度低，对于高致密度要求铸件而言，应该加强补缩；同时也需要结合铸件具体的结构特点，选择合适的补缩工艺措施，才能实现铸件内部完全致密。

随着铸造、生产设备技术的发展和汽车轻量化的需要，汽车零部件孤岛热节的设计越来越普遍，但对产品致密度的要求逐步提高，发热冒口因其补缩效率高、补缩距离大、金属液利用率高等优点，越来越多地应用到高端铸件的生产中，尤其是点补缩高发热冒口的开发对于存在大热节和局部孤立热节的铸件有很好的应用效果。