DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.01.013

商用车铝合金轮毂模拟分析及工艺优化

高世阳[1], 朱立华[2]
(1. 山东浩信机械有限公司 技术中心,山东 昌邑 261307; 2. 山东理工大学 机械工程学院,山东 淄博 255000)

摘　要:针对商用车铝合金轮毂在铸造时出现的缩松、气孔等缺陷进行机理分析和原因推断,并采用 AnyCasting 软件对铝合金轮毂低压铸造过程进行了模拟分析;针对充型卷起、充型氧化物、粒子追踪、凝固顺序等方面可能形成的缺陷进行了模拟,分析了法兰盘缩松形成的原因;针对法兰盘缩松缺陷位置、分布情况、产生原因制定了相应的预防措施,优化了铸造工艺。结果表明,经过试制检测,利用优化后的工艺可以消除铝合金轮毂常见缺陷,轮毂品质优良。

关键词:铝合金轮毂;低压铸造;缺陷消除;AnyCasting

中图分类号: TG249; TG245　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2022)01-0062-04

Solidification Simulation and Process Optimization of Commercial Vehicle Aluminum Alloy Hub

GAO Shiyang[1], ZHU Lihua[2]
(1. Technology Center of Shandong Haoxin Machinery Co., Ltd., Changyi 261307, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: The mechanism analysis and reasons were carried out for the defects such as shrinkage and porosity in casting of aluminum alloy wheels of commercial vehicles. Simulation analysis was carried out for the low-pressure casting process of aluminum alloy wheels by using AnyCasting software. The possible defects in filling roll, filling oxide, particle tracking and solidification sequence were simulated, and the causes of flange shrinkage were analyzed. According to the position, distribution and cause of shrinkage defects of flange, the corresponding preventive measures were formulated and the casting process was optimized. The results show that the common defects of aluminum alloy wheel hub can be eliminated by using the optimized process, and the wheel quality is good.

Key words: aluminum alloy wheel hub; low pressure casting; defect elimination; AnyCasting

铝是地壳中含量仅次于氧和硅的元素,约占地壳总质量的 7.5%, 是地壳中含量最高的金属元素。纯铝的密度为 2.7 t/m^3,具有良好的延展性、塑性,可进行多样化的机械加工。但纯铝的强度低,一般不能直接用作结构材料,只有通过合金化才能得到可做结构材料的铝合金。铝合金按照成型方法可分为变形铝合金和铸造铝合金。同牌号铸造铝合金的力学性能不如变形铝合金,但铸造铝合金具有良好的铸造性能,可以制成形状复杂的零件;不需要大型的变形加工设备,并具备节约金属、降低成本、减少工时等优点,在航空工业和民用工业都得到广泛的应用[1-2]。低压铝合金铸造具有效率高、成本低、铸件尺寸精度高、表面质量优的特点,一般低压铸造采用底部注入铝液,可实现较好的稳流充型,生产出的铸件质量好,工艺出品率较高,是目前一种成熟的铝合金铸造工艺[3]。然而,在实际生产中,也不可避免地出现如气孔、缩孔、缩松等铸造缺陷[4]。缩孔、缩松的产生会让轮毂出现中空断续, 在受力情况下会出现应力集中,长时间周期性疲劳运转,会严重威胁到车辆行驶安全[5]。因此,在铸件工艺设计时需重点针对排气、凝固顺序、补缩等方面进行充分研究[6],对铸造缺陷产生的原理进行具体分析, 并制定对应的措施预防缺陷问题的发生; 生产中可通过无损探伤等手段进行检验,保证产品质量[7]。在分析铸造缺陷产生原因时, 传统方式都是依靠经验进行分析判断,虽然能一定程度预防了缺陷出现,但这种方法往往不够全面,顾此失彼,可能解决了一种问题,又带来了其他问题。随着计算机技术的发展,全方位系统性的模流分析技术也得到了普遍的应用[8]。将铝合金材料成分、模流边界参数等输入到分析软件当中,可以对铸造过程中充型速度、流液追踪、粒子追踪、充型卷气、凝固顺序等方面进行分析铸造中出现的问题原因,采用对浇道位置变动、截面积优化、人为

收稿日期:2021-04-19

作者简介:高世阳(1984—),学士,工程师.主要从事铝合金轮毂及总成设计及铸造工艺研究方面的工作.
电话:15954480114,
Email:gaoshiyang@haoxingroup.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

干预冷却等措施对热节部位进行补缩、优化凝固顺序,最终达到良好的铸造效果。

1　研究对象与研究方法

商用车轮毂不同于乘用车轮毂,一般的乘用车轮毂集合轮毂、轮辋、轮辐等为一体,而商用车(重卡)的轮毂和轮辋是分别独立的两个零件,虽有关联但并非一体。本文所研究轮毂为商用车(重卡)装配轴承、油封等零件后再装配到桥壳轴管上的部分,并不涉及轮辋。

以国内某款 11.5 T 驱动桥轮毂为例,在对铸件进行 X 光检测时,产品法兰盘位置发现了缩松等缺陷。针对该缺陷产生的原因,首先进行了位置和产生机理分析, 并采用 AnyCasting 模流分析软件,对整个铸造过程进行了模拟判断分析。

图 1 为重卡商用车铝合金轮毂结构图。该产品一般采用重力方式进行铸造,大端向上,小端向下,浇口在模具上端,通过雨淋式浇注。

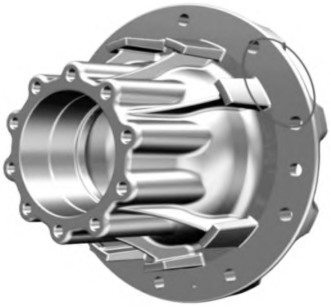


图 1 轮毂铸件示意图及缩松部位
Fig.1 Schematic of wheel hub and the shrinkage locations

图 2 为该铸件 X 光检测时,发现法兰盘部位等区域出现了缩松缺陷,缩松尺寸约为 17 mm×9 mm,缩松形态为连贯状。由于轮毂采用垂直浇注,法兰盘在铸造时为一较大区域的平面,浇注铝液时又是采用重力雨淋方法,铝水经过滤网后通过分流锥分流,铝液便直接倾斜进入模具,轮毂总高度 238 mm,其铝液倾斜高度约为 200 mm,高度落差大,铝液进入模具后会产生翻转、卷气等现象,气体会随铝液流动到法兰部位,法兰另一面设计了花瓣状凹凸结构,最薄部位 11 mm,法兰最薄部位首先凝固,而大平面会阻碍气体的流动, 随后法兰凸台凝固补缩通道关闭,气体无法排到顶部冒口,气体留存在法兰内部,导致缩松气体形成。

为了解决上述以法兰缩松为代表的铸造缺陷,重新制定新的工艺方法,采用低压铸造工艺,底部入水。降低浇注落差,实现缓流浇注。

2　模拟流态分析

将使用 UG NX 10.0 绘制好的三维轮毂模型使用 stp 格式导入到 AnyCasting 模流分析软件中,并对模流分析前置参数设定。

轮毂所用材料的化学成分 w(%)为:11.0~13.0 Si、3.5~4.5 Cu、0.6~0.9 Mg、0.02~0.04 Ti、0.01~0.05 La,余量为 Al。主要铸造参数及主要模具参数分别列于表 1 和表 2。

表1 主要铸造参数
Tab.1 Main casting parameters

项目	参数
浇注温度 / ℃	720
充型时间 / s	9
铝材牌号	AC4B
铝材固液相线 /℃	520~590
循环时间 /s	360
循环次数 / 次	3
冷却(水雾)	第 11 s 开启,持续 100 s,流量大小 6 L/min

表 2 主要模具参数
Tab.2 Main die parameters

金属模块	初始温度 /℃	涂料厚度 / mm	涂料材料
上模模块	420	0.12	
下模模块	480	0.15	氧化锌
钢芯模块	450	0.10	

图 3 为初始设计方案。根据低压铸造模式,采用小端朝上,大端向下的方式。在法兰盘上进行分模,对比产品分模后, 上模表面积占 63.8%, 下模占 36.2%,从开模后铸件留在上模角度利于生产效率,同时下模在开模时温度高易拉伤铸件, 所以结构复杂的关键部位不宜设置在下模。同时,顶部厚度最大

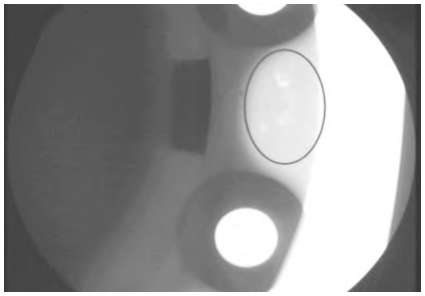


图 2 X 光检测发现的缩松区域
Fig.2 Shrinkage area detected by X-ray inspection

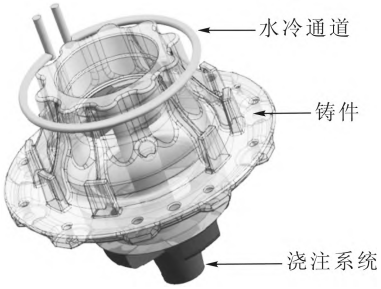


图 3 轮毂铸造初始方案设计
Fig.3 Initial design of wheel hub casting

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

可达 37.9 mm,所以增设水雾冷却[9],以保证凝固顺序。内腔上下两端采用 40CrMo 钢芯,中段采用覆膜砂芯,呋喃树脂固化,浸涂醇基涂层。浇注系统设计为内嵌式四点分流结构,上部采用进料道直连分流补缩设计。铸造过程中压力随时间的变化情况如图 4 所示。

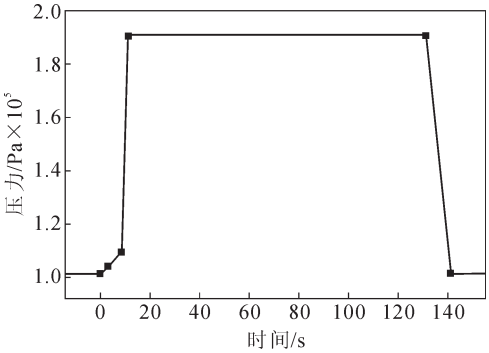


图 4 铸造过程中压力随时间的变化
Fig.4 Variation of pressure with time during casting

3 模拟结果分析及试制验证

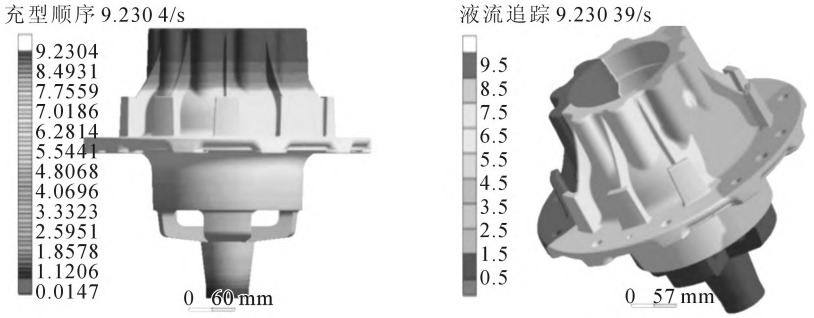
图 5 为铸造充型顺序模拟和液流分区追踪结果。可以看出,初始方案充型时间为 9.23 s,充型过程都比较平稳,未出现严重的紊流现象,未出现提前进料和铝液翻转现象。初始方案顶部充型时液面平稳,所以汇流区域基本在浇口处,基本没有圆周方向的铝液汇流。

图 6 为粒子流向追踪和充型速度模拟结果。可以看出,初始方案在浇口位置都会存在短暂的停留,待液面平缓后再进入型腔,提高进料的均匀性,减少进料时的紊流现象,未出现严重的打转和回流现象,卷入渣和气体的风险都比较低。初始方案初始进料时比较缓慢,充型速度保持在 12 cm/s 左右,充型到大法兰面时速度达到 30 cm/s 左右,法兰充满之后速度降低到 20 cm/s 以下,最终顶部结构简单,适当提高充型速度,快速充满型腔。

图 7 为充型氧化物和充型卷气模拟结果。可以看出,氧化物风险位置主要分布在顶部区域,可以通过冒口设置,聚集氧化物向去料部位。初始方案在未设置排气条件下,发现充型过程中法兰盘部的孤立气团,即卷气风险区域。虽然两种铸造工艺方式略有不同,但受产品结构影响,该项分析也复原了铸件中法兰盘面存在缩松的问题。可以通过增设排气顶杆、排气线、负压吸气等措施后将气体引导出铸件或引导至加工余量部位,在机械加工后可消除缩松问题的出现。

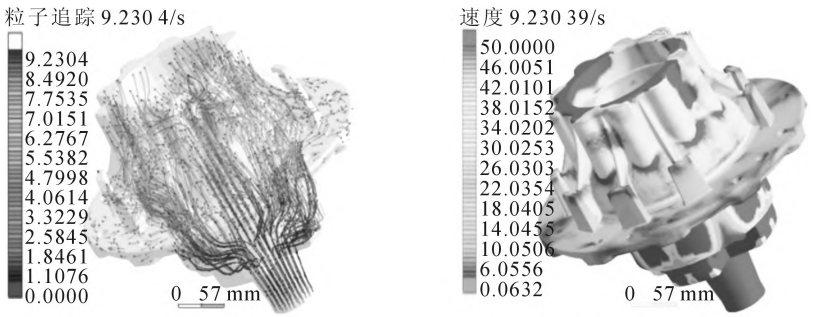
通过以上分析,提出了以下的优化措施:①顶部、底部采用联通式浇道;②顶部厚大部位增设水雾冷却;③增设排气顶杆、排气线、负压吸气;④设置排气、补缩、聚集氧化物为目的的冒口;⑤增大入水口处浇道截面积,上移浇口。

优化后凝固顺序如图 8 所示,从顶部到底部依



(a)充型顺序 (b)液流分区追踪

图 5 铸造充型顺序和液流分区追踪模拟结果
Fig.5 Simulated filling sequence and liquid flow partition tracking during filling



(a)粒子流向追踪 (b)充型速度

图 6 粒子流向追踪和充型速度模拟结果
Fig.6 Simulated particle flow tracing and filling speed

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

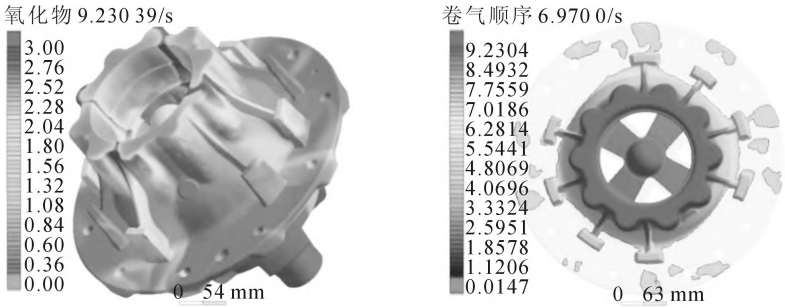
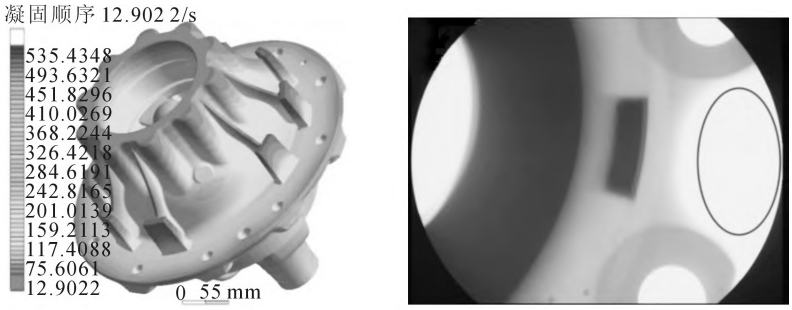


图 7 充型氧化物和充型卷气模拟结果

Fig.7 Simulated filling oxide and air entrainment during mold filling



(a)凝固顺序　　(b)X射线探伤结果

图 8 工艺优化后的凝固顺序和 X 射线探伤结果,未发现缩松

Fig.8 For optimized scheme the solidification sequence and X-ray inspection result, no shrinkage

次冷却,冷却凝固未出现孤立液相,产品上无缩松风险。初始方案模流分析后,发现如缩松为代表的缺陷,按照上述措施优化实施试制后,通过 X 光探伤观察法兰部位的缩松问题已被解决,其他部位均未发现明显的铸造缺陷。

4 结论

(1)针对商用车铝合金轮毂在铸造时出现的缩松缺陷,利用 AnyCasting 软件通过模流分析,发现法兰盘是由于排气不良和凝固顺序导致的孤立气团形成的缩松。

(2)针对上述问题制定了增设排气顶杆和排气线等优化措施,由重力铸造改为了低压铸造。对厚大部位增设了水雾冷却,对顺序凝固和细化组织晶粒起到了有效的作用[10]。对冒口的设置,对聚集铸件内部氧化物、补缩起到了良好效果[11]。通过增大入水处横浇道和内浇道截面积、上移浇口等方法,对铸造热节起到了较好的补缩作用,最终消除了缩松等缺陷。

(3)通过多轮试制验证,该商用车铝合金轮毂低压铸造工艺已达到良好的使用效率,试制成品率到达 95.38%,加工料废率为 0.5%,工艺出品率达到 85%左右。

参考文献:

[1] 杨兵兵,刘洋. 铝合金铸件铸造技术[M]. 北京:机械工业出版社,2019.

[2] 郁兆昌. 金属工艺学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

[3] 孙冬恩,程和法,周宏伟,等. 低压铸造铝合金轮毂的数值模拟及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金,2020, 40(7): 763-764.

[4] 林波,张宾. 低压铸造铝合金轮毂模具设计优化[J]. 内燃机与配件,2020(12): 134-135.

[5] 刘金祥,张庆,左正兴,等. 微观缩松对蠕铁微观组织和力学性能的影响[J]. 北京理工大学学报,2015, 35(8): 847-852.

[6] 任凯,冯立超,孙立,等. 低压铸造铝合金轮毂的研究现状[J]. 热加工工艺,2021(9): 14-15.

[7] 尚泽强. 空客 A320 系列主轮毂无损检测实例分析[J]. 航空维修与工程,2021(3): 91-93.

[8] 程伟,刘大龙,何鹏达. 基于 ProCAST 的电机罩压铸模具模流分析[J]. 机电工程技术,2014, 43(6):1-3.

[9] 胡向锋. 水雾冷却对车轮模具使用寿命的影响 [J]. 模具工业,2018, 44(7): 62-64.

[10] 徐博聪. 铝合金凝固组织的细化方法和机理概述 [J]. 企业科技与发展,2018(8): 77-78.

[11] 李浩,康永飞,白朴存. 复杂薄壁铝合金铸件铸造过程数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2019, 39(11): 1195-1198.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2022 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号:52-64　国外发行号:M855　国内定价:25 元/本　海外定价:25 美元/本

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net