● 工艺技术 Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.2187

大尺寸铝轮毂多浇道铸造工艺的数值模拟

周 振[1],卢德宏[1],逯东辉[2],李贞明[2]
(1. 昆明理工大学 材料与科学工程学院,云南 昆明 650093; 2. 云南富源今飞轮毂制造有限公司,云南 曲靖 655000)

摘 要:以实际低压铸造生产的 A356 铝合金大尺寸轮毂铸件为对象,对单浇道、双浇道和三浇道 3 种浇注工艺方案进行了充型和凝固模拟。根据模拟结果,分别对比了 3 个工艺方案的缺陷分布情况、充型效率、晶粒半径大小以及卷气情况。结果表明,三浇道工艺不仅提高了轮毂质量,减少了缺陷,而且大大缩短了生产时间,是有潜力的新工艺。

关键词:低压铸造;铝合金轮毂;工艺优化;多浇道
中图分类号:TG249.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2023)03-0286-07

Numerical Simulation of the Multi-runner Casting Process for Large Size Aluminum Hub

ZHOU Zhen[1], LU Dehong[1], LU Donghui[2], LI Zhenming[2]
(1. School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Yunnan Fuyuan Jinfei Wheel Manufacturing Co., Ltd., Qujing 655000, China)

Abstract: The filling and solidification of large-size A356 aluminum alloy hub castings produced by low pressure casting were simulated for three pouring process schemes, namely, single runner, double runner and triple runner. According to the simulation results, the defect distribution, filling efficiency, grain radius and entrainment of the three process schemes are compared. The results show that the triple runner process not only improves the quality of the hub and reduces the defects, but also greatly shortens the production time, which is a potential new process.

Key words: low pressure casting; aluminum alloy wheel; process optimization;multiple sprue

随着汽车行业的发展,对铝合金大尺寸轮毂的需求不断增多。目前,铝合金轮毂主要采用低压铸造工艺生产[1]。一般而言,轮毂在低压铸造时往往采用单浇道的浇注系统,但是对于大尺寸轮毂,如 50.8 cm 以上的轮毂,采用常规单浇道工艺,存在生产效率较低、缺陷较多等问题[2-4]。如果采用多浇道的浇注系统,不仅能改善轮毂的力学性能,还能提高轮毂的生产效率。赵岩等[5]研究表明,大型铝合金轮毂低压铸造采用单浇道工艺时,会在热节处产生缩松、缩孔。边雷雷[6]研究表明,重载车低压铸造铝合金轮毂采用单浇道工艺时,轮毂铸造产生的缺陷会导致轮毂不同部位的力学性能变差。陈玖新等[7]研究表明,低压双边浇铸可提高车轮轮辐的力学性能,同时满足中高端市场对车轮“大直径、高强度、轻量化”的要求。朱大智等[8]通过对比双边浇工艺和中心浇工艺生产车轮的轮辐组织及性能,确定了用双边浇工艺生产的车轮轮辐力学性能更卓越,屈服强度、抗拉强度和断后伸长率分别提升了12%、10%和66%,且微观组织更致密,二次枝晶间距下降了 13%。

上述研究表明,双浇道相比于单浇道能改善轮辐的力学性能,本文在常规单浇道工艺的基础上,结合轮毂的数值模拟,提出针对大型铝合金轮毂的多浇道工艺,以提高生产效率,减少铸造缺陷。

1 实验材料及工艺

本实验所用轮毂材料为 A356 铝合金,其化学成分如表 1 所示。轮毂直径为 620 mm,其三维图如

收稿日期:2022-06-15
基金项目:云南省重大科技专项(202102AB080015)
作者简介:周 振,1996 年生,硕士生.研究方向:低压铸造研究.电话:13217412922, Email: 1657807462@qq.com
通讯作者:卢德宏,1968 年生,博士,教授.研究方向:铸造技术研究.电话:13888324279, Email:ldhongkust@126.com
引用格式:周振,卢德宏,逯东辉,等.大尺寸铝轮毂多浇道铸造工艺的数值模拟[J].铸造技术,2023, 44(3): 286-292.
ZHOU Z, LU D H, LU D H, et al. Numerical simulation of the multi-runner casting process for large size aluminum hub [J]. Foundry Technology, 2023, 44(3): 286-292.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 A356铝合金的化学成分 w/%

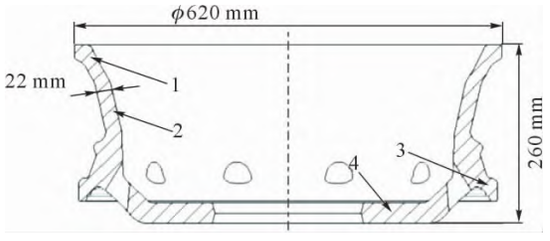
Tab.1 Chemical composition of A356 aluminum alloy

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Sr	Al
6.5~7.5	0.3~0.45	<0.12	<0.1	<0.05	<0.05	<0.2	0.01~0.02	余量

图 1 轮毂三维图

Fig.1 3D view of the wheel hub

图 1 所示，轮辐平面较大，轮辋最小壁厚为 22 mm，轮辐与轮辋交界处存在孔洞，轮毂主要结构如图 2 所示。采用 ProCAST 模拟软件进行铸造充型和凝固模拟。3 个工艺方案的铝液充型温度为 700 ℃，且都经过精炼除气。模具材料为 H13，其预热方式为烤模炉加热，预热温度如表 2 所示，模具冷却方式均为空冷。各界面换热系数如表 3 所示。



1- 内轮缘；2- 轮辋；3- 外轮缘；4- 轮辐

图 2 轮毂结构图

Fig.2 Structure diagram of the hub

表2 不同种类模具温度

Tab.2 The temperature of different types of molds

模具种类	上模	侧模	下模
预热温度 /℃	440	420	460

表3 面换热系数

Tab.3 Heat transfer coefficient of the interface

界面	铸型-金属液	铸型-大气
传热系数 /(W·m^{-2}·K^{-1})	1 000	20

1.1 单浇道工艺方案

图 3 为单浇道工艺方案示意图。单浇道工艺划分网格后，面网格为 117141，体网格为 664744。单浇道工艺由上模、下模、侧模、分流锥、底部浇口等结构组成，底部浇口位于下模中部，单浇道工艺的加压曲线如图 4 所示。充型时，金属液经分流锥分流，填充轮辐，随后填充轮辋，最后将型腔充满。

1.2 双浇道工艺方案

图 5 为双浇道工艺方案示意图。双浇道工艺划分网格后，面网格为 151348，体网格为 1478179。双

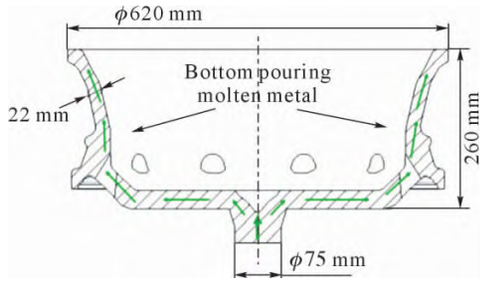


图 3 单浇道工艺方案示意图

Fig.3 Schematic diagram of the single runner process

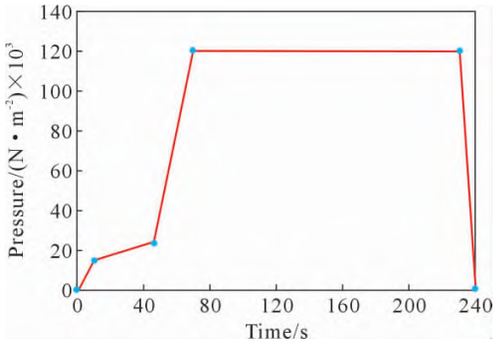


图 4 加压工艺曲线

Fig.4 Pressurization process curve

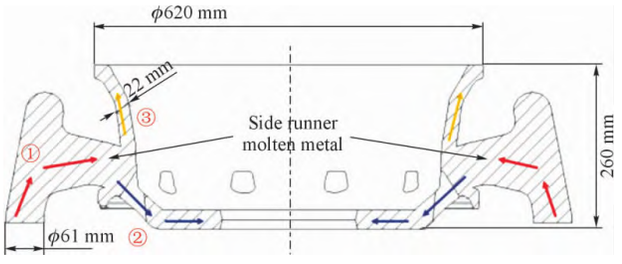


图 5 双浇道工艺方案示意图

Fig.5 Schematic diagram of the double runner process

浇道工艺结构由底部浇注优化为侧浇道浇注，该方案由上模、下模、侧模、2 个侧模浇口等结构组成，2 个侧浇口对称分布于轮辐与轮辋的交界处。该方案的模拟参数与单浇道保持一致，只将单浇道工艺结构优化为双浇道工艺结构。充型时，金属液通过 2 侧浇口流入到型腔内部，随后填充轮辐，将轮辐充满后向上填充轮辋，最后将型腔充满。

1.3 三浇道工艺方案

图 6 为三浇道工艺方案示意图。三浇道工艺划分网格后，面网格为 159778，体网格为 1543193。三

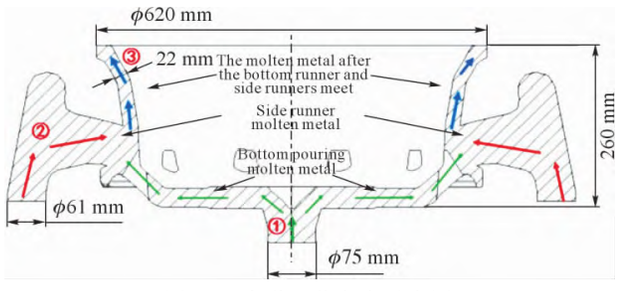


图 6 三浇道工艺方案示意图

Fig.6 Schematic diagram of the triple runner process

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

浇道工艺方案是单浇道方案和双浇道方案的结合，该方案由上模、下模、侧模、分流锥、底部浇口、2 个侧模浇口等结构组成，底注浇口位于下模的中部，2 个侧浇口对称分布于轮辐与轮辋的交界处。模拟参数方面，三浇道两侧模浇口的压力与双浇道工艺保持一致，仅将底部浇口的压力相比，单浇道工艺在充型阶段提高 2 000 N/mm^2。该工艺能使底部金属液先将轮辐填充完，随后底部金属液在两侧浇口与轮辋相交处和侧模浇口的金属液相遇，极大地避免了金属液的对流。

2 不同工艺模拟结果分析

2.1 不同工艺缺陷分布对比

缩孔缩松是由于在逐层凝固方式下外层凝固后内部仍未凝固，而后当内部金属液凝固时，外部已无法给予补缩，最终形成空洞[9]。Niyama 判据是日本 Niyama 比较 3 种尺寸、5 种成分圆柱形铸钢件的缩孔缩松分布状况，发现的一种用于预测铸件缩孔，尤其是缩松的判据[10]。Niyama 的研究表明，铸件凝固终了时的温度梯度 G 与冷却速度 R 二次方根的比值 $G/\sqrt{R}$ 是最能反映铸件内部缩孔和缩松分布的函数值。当 $G/\sqrt{R}$ 值小于某一临界值时，在该区域内就会产生缩孔和缩松缺陷，且在所研究的范围内该临界值与合金成分、铸件形状和尺寸无关[11]。目前 MAGMA、FTSolver 及 ProCAST 等铸造模拟软件都采用 Niyama 判据法来预测铸件的缩孔缩松，取得了一定的效果[12-14]。

2.1.1 单浇道工艺的缺陷分布

单浇道工艺凝固时，轮辋处的凝固场随温度降低呈梯度下降，轮辐上的孔与下模接触，下模温度低于金属液温度，使得孔下方金属液的冷却速率大于孔上方金属液，孔内侧金属液的冷却速率大于孔外侧，导致孔与孔之间的金属液相对于孔周围的金属液晚凝固，从而产生缩孔缩松。随后轮辐凝固时，冷却速率快且面积大，轮辐中部先于轮辐与轮辋交界处和轮心处凝固，一方面阻断了轮辐与轮辋交界处金属液的补缩通道，另一方面轮辐靠近轮心周围的位置能得到补缩，远离轮心部位得不到补缩而产生细小的缺陷。图 7 显示了单浇道工艺的缩孔缩松分布情况，经软件计算得到单浇道工艺的孔隙体积为 3.8 cm^3。模拟得到的缺陷位置与实际生产的轮毂缺陷位置相符，轮辐与轮辋的孔与孔之间出现较大缺陷，轮辐大平面出现细小、分散的缺陷，严重影响轮毂的质量。

2.1.2 多浇道优化工艺后的缺陷分布

针对单浇道工艺充型较慢且存在较多的缺陷的问题，提出了多浇道的优化工艺，探究多浇道对轮毂缩孔缩松的影响，最终减少或消除缺陷，得到最优的工艺。根据缺陷位置及大小对工艺参数进行改进，在原工艺的基础上提出双浇道工艺和三浇道工艺，并进行模拟。

图 8 为工艺改进后多浇道的缺陷分布图。经软件计算得到双浇道工艺的孔隙体积为 56.9 cm^3。从图 8(a)可以看出，轮辐大平面的细小缺陷基本消除，

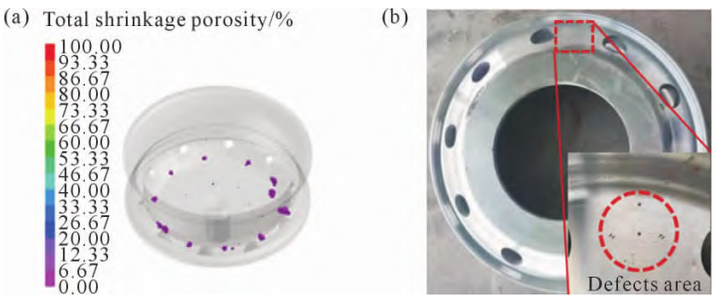


图 7 铝合金轮毂单浇道工艺缩孔缩松分布图：(a) 缩孔缩松模拟图，(b) 缩孔缩松实物图

Fig.7 Distribution of shrinkage porosity and porosity in the single runner process of the aluminum alloy wheel bub: (a) simulated image, (b) actual image

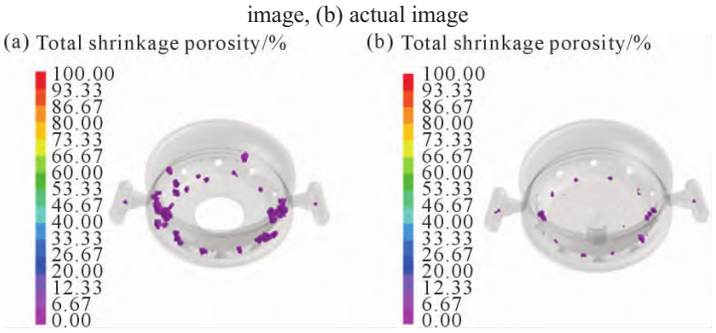


图 8 多浇道缺陷图：(a) 双浇道工艺，(b) 三浇道工艺

Fig.8 Multi-runner defect diagram: (a) double runner process, (b) triple runner process

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

两浇口下方产生大量聚集的缺陷，且缺陷的大小从浇道下方沿着轮辋与轮辐交界处依次递减至浇口的 2 股金属液对流处。这是因为在图 9 中，2 股金属液在轮辐中部相遇形成对流，对流使金属液向下填充轮辐后又向上填充轮辋，致使轮辐对流处的金属液几乎没有流动，所以处于对流处的金属液比其他位置先凝固，同时轮辋和轮辐先于轮辋与轮辐交界处凝固，使整个轮辋与轮辐交界处得不到金属液的补充，从而产生缺陷并向对流处依次减少。

经软件计算得到三浇道工艺的孔隙体积为 3.6 cm^3，相比于单浇道减少了 0.2 cm^3。从图 8(b)可以看出，轮辐大平面处的缺陷相比于单浇道工艺减少，且轮辐孔与孔之间的缺陷也比单浇道工艺有所减少。这是因为在图 10 中，充型时通过改变底部浇口的压力先将轮辐部位填充完，极大地避免了金属液在型腔内的对流，同时由于两侧浇道的存在，轮辐与轮辋交界处也能得到金属液的补缩。图 11 所示为三浇道凝固，方式为顺序凝固，2 侧浇口下方不是最后凝固位置，所以该位置的缺陷没有双浇道的多，同时由于底部浇口的补缩，三浇道轮辐中部的细小缺陷相比单浇道工艺也大大减少。

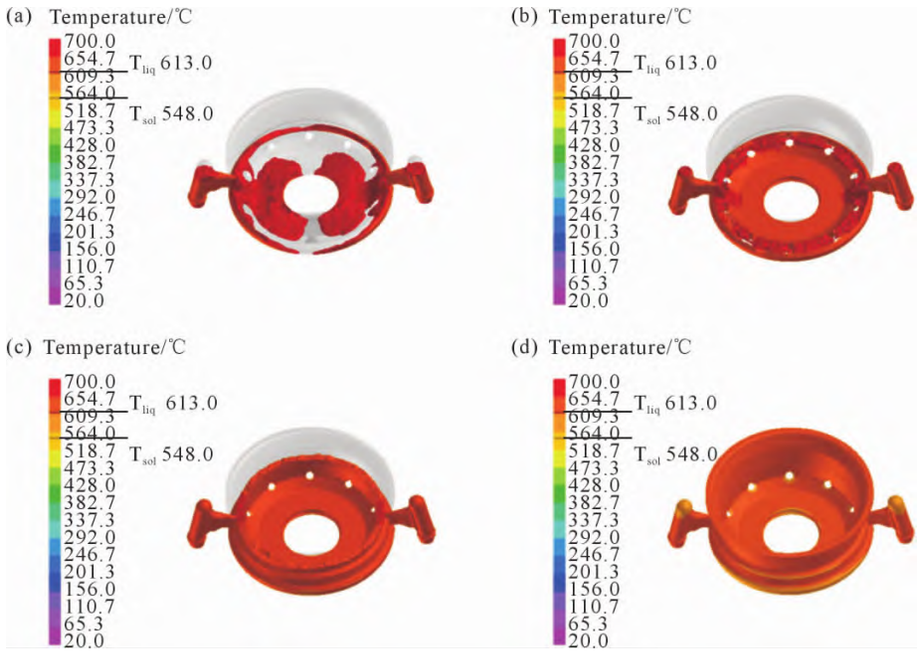


图 9　双浇道充型图：(a) 充型 25%，(b) 充型 50%，(c) 充型 75%，(d) 充型 100%

Fig.9　Double runner filling diagram: (a) 25% filling, (b) 50% filling, (c) 75% filling, (d) 100% filling

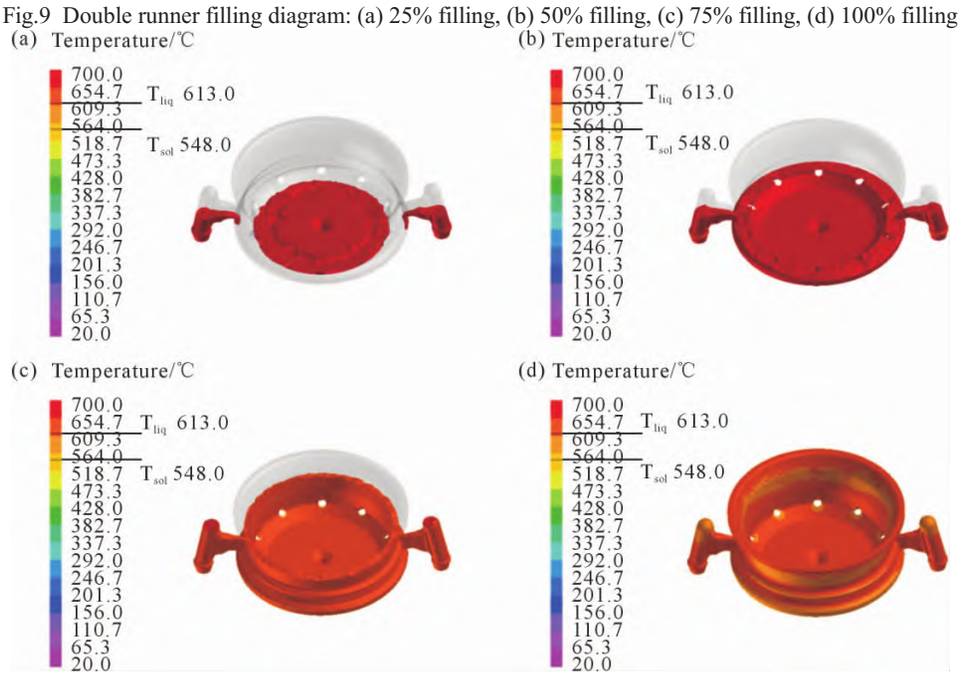


图 10　三浇道充型图：(a) 充型 25%，(b) 充型 50%，(c) 充型 75%，(d) 充型 100%

Fig.10　Triple runner filling diagram: (a) 25% filling, (b) 50% filling, (c) 75% filling, (d) 100% filling

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

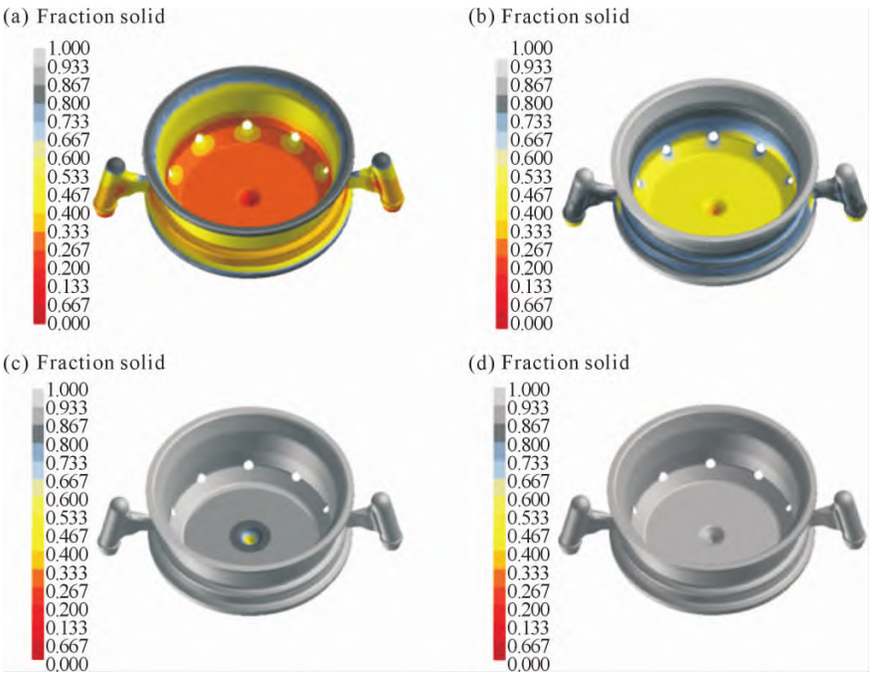


图 11 三浇道凝固图:(a) 凝固 25%,(b) 凝固 50%,(c) 凝固 75%,(d) 凝固 100%

Fig.11 Solidification diagram of thirple runner: (a) solidification 25%, (b) solidification 50%, (c) solidification 75%, (d) solidification 100%

2.2 不同工艺的充型效率对比

不同工艺对铸件的充型效率有较大的影响[15-16]。随着浇道数量的增加,不同工艺的充型时间依次减少,其中单浇道工艺为 33 s,双浇道工艺为 31 s,三浇道工艺为 26 s,相比单浇道工艺,三浇道缩短了 7 s。充型效率通过式(1)进行计算,计算得到的充型效率提高了 21.2%。

$$充型效率=\frac{三浇道充型时间-单浇道充型时间}{单浇道充型时间} \quad (1)$$

2.3 不同工艺的晶粒半径大小对比

晶粒大小对金属材料性能有很大影响。按照 Hall-Petch 公式,晶粒越细,材料的强度越好[17-18]。图 12 为不同方案在模具空冷的条件下晶粒半径大小对比图,图 13 为不同方案下轮辋靠近轮辐处的金相组织图片。从模拟结果和实际结果对比发现,模拟晶粒的半径大小基本与实际相符合。单浇道工艺的内轮缘部分晶粒半径与双浇道工艺和三浇道工艺相差 200 μm,但从整个轮毂的晶粒尺寸来看三浇道与单浇道差别不大,说明三浇道在保证充型速度快的前提下,轮毂的强度也得到了保证。

2.4 不同工艺卷气情况对比

低压铸造充型过程中,充型速度、浇注工艺、模具排气的设置和铝液的精炼除气等因素都会对卷气缺陷产生影响[19-20]。本文保证模具排气的设置和铝液的精炼除气相同的情况下,研究了浇注工艺对卷气情况的影响。充型速度方面,单浇道工艺的充型压力与双浇道保持一致,三浇道仅提高了底部浇口的压力,其侧模浇口的压力与单浇道保持一致。不同工艺的卷气对比如图 14 所示。从图中可以看出,双浇道产生卷气的原因是充型时会在轮辐的中部产生对流现象,三浇道通过底部浇口压力的改变基本消除了对流的影响,发生卷气的概率甚至少于单浇道工艺。

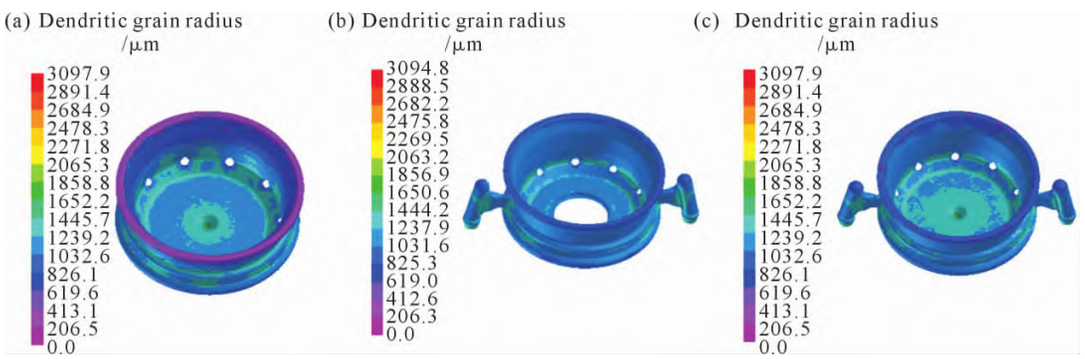


图 12 不同工艺的晶粒半径对比图:(a) 单浇道工艺,(b) 双浇道工艺,(c) 三浇道工艺

Fig.12 Grain radius comparison of different processes: (a) single runner process, (b) double runner process, (c) triple runner processs

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

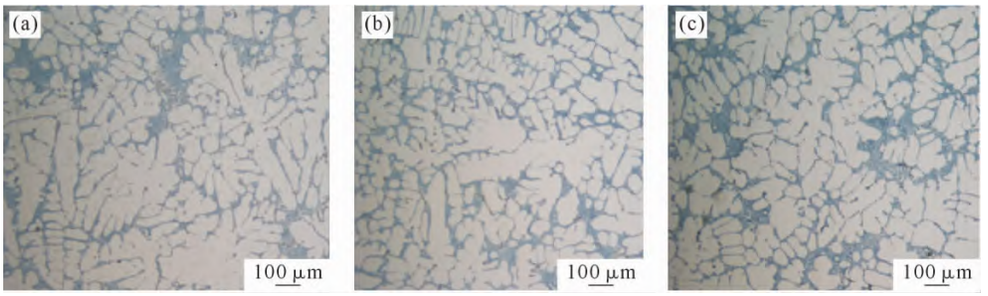


图 13 轮辋靠近轮辐处的金相组织图片：(a) 单浇道工艺，(b) 双浇道工艺，(c) 三浇道工艺

Fig.13 The metallographic structure of the rim near the spoke: (a) single runner, (b) double runner process, (c) triple runner process

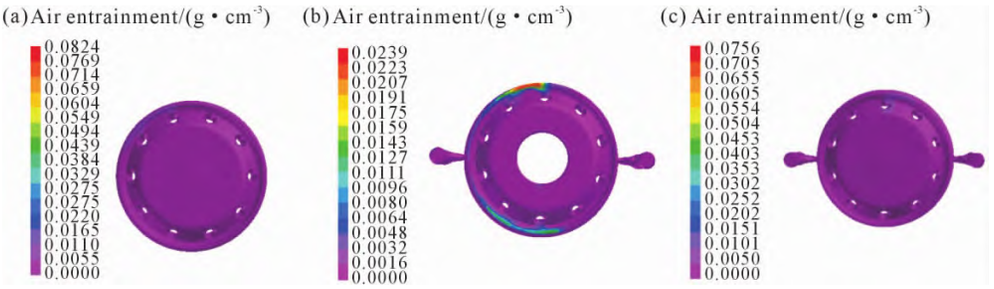


图 14 不同工艺的卷气对比图：(a) 单浇道工艺，(b) 双浇道工艺，(c) 三浇道工艺

Fig.14 Comparison of air entrainment of different processes: (a) single runner, (b) double runner process, (c) triple runner process

将轮毂不同工艺进行对比，得出以下结果：①通过对不同工艺方案缺陷分布的分析，发现单浇道工艺轮辐与轮辋的孔与孔之间出现较大的缺陷，轮辐大平面处出现细小、分散的缺陷；②双浇道工艺两浇口下方产生大量聚集的缺陷，且缺陷的大小从浇道下方沿着轮辋与轮辐交界处依次递减至浇口的两股金属液对流处；③三浇道工艺轮辐大平面处的缺陷相比于单浇道工艺大大减少，且轮辐的孔与孔之间的缺陷也比单浇道工艺有所减少。对比不同方案，三浇道缺陷最少，不仅提高了轮毂质量，而且大大缩短了充型时间。

从单浇道工艺的缩孔缩松分布情况分析可知，模拟得到的缺陷位置与实际生产的轮毂缺陷位置相符合，说明模拟参数的设置与实际生产情况相近。从充型效率分析可得，三浇道的充型效率大幅提高，相比于单浇道，充型效率提高了 21.2%。

通过对晶粒半径的模拟结果分析，发现 3 种工艺的晶粒半径尺寸差别不大，使得三浇道工艺生产轮毂的力学性能能与单浇道持平。从卷气情况分析可知，三浇道通过对不同浇口压力的控制基本消除了对流的影响，减少了卷气发生的概率。

3　结论

(1)通过对不同方案的对比，发现三浇道浇注工艺轮毂的凝固缺陷最少，轮辐大平面处的缺陷相比于单浇道工艺减少，同时充型效率提高了 21.2%。

(2)从卷气模拟和晶粒半径模拟结果可知，3 种浇注系统的晶粒半径尺寸整体上差别不大，与单浇道工艺相比，三浇道工艺生产的轮毂强度能够保证。

参考文献：

[1] 周振，卢德宏，李贞明，等. 低压铸造铝合金轮毂的研究现状[J]. 中国铸造装备与技术，2022, 57(2): 58-64.
ZHOU Z, LU D H, LI Z M, et al. Research status of low pressure casting aluminum alloy wheel hub[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2022, 57(2): 58-64.

[2] 王冠乾，牛晓峰，侯华，等. 铝合金汽车轮毂低压铸造数值模拟缺陷预测及改进措施[J]. 铸造技术，2016, 37(2): 273-276.
WANG G Q, NIU X F, HOU H, et al. Numerical Simulation and Defect Prediction on Al-alloy Wheel Hub in Low-pressure Casting Process[J]. Foundry Technology, 2016, 37(2): 273-276.

[3] 易有福，龙思远，徐绍勇，等. 低压铸造 A356 铝合金轮毂的微观组织和力学性能[J]. 特种铸造及有色合金，2008, 28(5): 373-375.
YI Y F, LONG S Y, XU S Y, et al. Microstructure and mechanical properties of low pressure cast A356 aluminum alloy wheel hub[J] Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008, 28 (5): 373-375.

[4] 高世阳，朱立华. 商用车铝合金轮毂模拟分析及工艺优化[J]. 铸造技术，2022, 43(1): 62-65.
GAO S Y, ZHU L H. Simulation analysis and process optimization of aluminum alloy wheels for commercial vehicles[J]. Foundry Technology, 2022, 43 (1): 62-65.

[5] 赵岩，王玲娟，李秀荣，等. 低压铸造大尺寸铝合金轮毂的数值模拟及模具优化[J]. 特种铸造及有色合金，2016, 36(6): 612-616.
ZHAO Y, WANG L J, LI X R, et al. Numerical simulation and die optimization of low pressure casting large size aluminum alloy wheel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(6): 612-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

616.

[6] 边雷雷. 重载车低压铸造铝合金轮毂疲劳寿命分析研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2015.
BIAN L L. Fatigue life analysis and research of low-pressure cast aluminum alloy hub for heavy duty vehicle[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015.

[7] 陈玖新,代颖辉,叶珍,等. 低压双边浇铸造铝合金车轮铸件成形数值模拟及优化[J]. 铸造,2016, 65(4): 336-341.
CHEN J X, DAI Y H, ZHEN Y E, et al. Numerical simulation and optimization of casting forming for low pressure bilateral pouring casting aluminum alloy wheel[J]. Foundry, 2016, 65(4): 336-341.

[8] 朱大智, 王胜辉. 双边浇工艺铸造铝合金车轮的研究及优化[J]. 铸造,2018, 67(2): 185-188.
ZHU D Z, WANG S H. Research and optimization of aluminum alloy wheel casting by bilateral pouring method [J]. Foundry, 2018, 67(2): 185-188.

[9] 吕云霞. 基于 ProCAST 软件的大型铸钢件缩孔缩松预测判据及铸造工艺优化[J]. 铸造技术,2015, 36(11): 2725-2727.
LV Y X. Prediction criteria for shrinkage porosity and casting process optimization of large steel castings based on ProCAST software[J]. Foundry Technology, 2015, 36 (11): 2725-2727

[10] 刘利刚,杨庆祥,李强,等. 利用 Niyama 判据预测离心铸造轧辊缩孔缩松缺陷[J]. 铸造技术,2009, 30(12): 1580-1582.
LIU L G, YANG Q X, LI Q, et al. Using Niyama criterion to predict shrinkage cavity and porosity defects of centrifugal casting rolls[J]. Foundry Technology, 2009, 30 (12): 1580-1582.

[11] 潘利文,郑立静,张虎,等. Niyama 判据对铸件缩孔缩松预测的适用性[J]. 北京航空航天大学学报,2011, 37(12): 1534-1540.
PAN L W, ZHENG L J, ZHANG H, et al. Applicability of Niyama criterion to prediction of shrinkage cavity and porosity of castings [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37 (12): 1534-1540.

[12] 李洪应,贾俊,艾明. MAGMASOFT 在平衡轴支架开发中的应用[J]. 铸造技术,2021, 42(5): 357-360.
LI H Y, JIA J, AI M. Application of MAGMASOFT in the development of balance shaft support[J]. Foundry Technology, 2021, 42 (5): 357-360.

[13] 李荣德,张子慧,向青春,等. Niyama 判据预测大型铸钢件旋回破碎机横梁缩孔缩松缺陷[J]. 铸造技术,2015, 36(5): 1196-1200.
LI R D, ZHANG Z H, XIANG Q C, et al. Niyama criterion for predicting shrinkage cavity and porosity defects of large steel casting rotary crusher beam[J]. Foundry Technology, 2015, 36 (5): 1196-1200.

[14] 莫文锋. 基于 ProCAST 汽车铝合金轮毂铸造数值模拟及其优化[J]. 河南科技,2022, 41(4): 29-35.
MO W F. Numerical simulation and optimization of automobile aluminum alloy wheel casting based on ProCAST[J]. Henan Science and Technology, 2022, 41 (4): 29-35.

[15] 刘闪光,罗传彪,李国爱,等. 低压铸造充型过程动力学模型[J]. 铸造技术,2018, 39(1): 100-103.
LIU S G, LUO C B, LI G A, et al. Dynamic model of mold filling process in low pressure casting[J]. Foundry Technology, 2018, 39 (1): 100-103.

[16] 崔立彦. 铝合金轮毂低压铸造充型过程数学模型的简化及验证[J]. 铸造技术,2014, 35(3): 562-564.
CUI L Y. Simplification and verification of the mathematical model of the filling process of the low-pressure casting of aluminum alloy wheel hub[J]. Foundry Technology, 2014, 35 (3): 562-564

[17] 陈希韩, 敖兵. 铸造铝合金轮毂的热处理工艺与组织性能研究[J]. 铸造技术,2018, 39(5): 1115-1117, 1120.
CHEN X H, AO B. Research on heat treatment process and microstructure and properties of cast aluminum alloy wheel hub[J]. Foundry Technology, 2018, 39 (5): 1115-1117, 1120.

[18] 介石磊, 彭俊, 郝春雨. 汽车铝合金轮毂低压铸造工艺研究[J]. 铸造技术,2017, 38(11): 2785-2788.
JIE S L, PENG J, HAO C Y. Research on low pressure casting process of automobile aluminum alloy wheel hub[J]. Foundry Technology, 2017, 38 (11): 2785-2788.

[19] 陈志. 基于 Magmasoft 的低压铸造铝车轮模具开发环境研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2014.
CHEN Z. Research on the development environment of low-pressure casting aluminum wheel mold based on Magmasoft[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.

[20] 王磊,郑峰峰,韩明,等. 铝合金低压铸造中孔洞类缺陷及预防措施浅析[J]. 铸造技术,2021, 42(11): 969-972.
WANG L, ZHENG F F, HAN M, et al. Analysis on the hole defects and preventive measures in aluminum alloy low pressure casting [J]. Foundry Technology, 2021,42 (11): 969-972.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net