

• 工艺技术 Technology •
DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2024.3251

低压铸造铝合金轮毂工艺参数对缩孔缺陷的影响

李钟尧¹, 吴雪龙¹, 苗以升², 薛程鹏², 郎玉玲³, 孔德才³, 马小英³, 乔海波³, 王俊升^{1,2,4}

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学材料学院, 北京 100081; 3. 中信戴卡股份有限公司, 河北秦皇岛 066010; 4. 北京理工大学前沿交叉科学研究院, 北京 100081)

摘要: 乘用车轮毂 90% 以上采用铝合金低压铸造工艺实现, 轮毂铸造缺陷是影响其机械性能和服役安全性的主要因素之一, 因此控制轮毂铸件的缺陷不仅是产品质量问题, 也是关乎汽车整体的服役安全性问题。本文系统研究并总结了低压铸造工艺参数对孔洞缺陷的影响。针对低压铸造轮毂中可能产生的缩孔缩松缺陷, 研究了浇注温度、模具预热温度、充型速度、保压压力等工艺参数对缩孔缺陷分布规律, 发现在一定范围内, 浇注温度与模具预热温度的上升, 均可使金属液充型能力提高, 减少缩孔缺陷; 但当浇注温度或模具预热温度过高时, 缩孔开始增加。在保证不发生欠充型的前提下, 充型加压速度越慢, 则充型过程越缓慢平稳, 缩孔出现的概率越低。随着保压压力的提高, 缩孔缺陷减少。

关键词: 汽车轮毂; 低压铸造; 铝合金; 缩孔缩松; 有限元计算

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)02-0163-10

Effects of Low-pressure Casting Processes on Shrinkage Porosity Formation in Al Alloys

LI Zhongyao¹, WU Xuelong¹, MIAO Yisheng², XUE Chengpeng², LANG Yuling³, KONG Decai³,
MA Xiaoying³, QIAO Haibo³, WANG Junsheng^{1,2,4}

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Materials Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. CITIC Dicastal Co., Ltd., Qinhuangdao 066010, China; 4. Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Over 90% of passenger car wheels are made of aluminum alloys by a low-pressure casting process. Casting defects are among the most important factors influencing the mechanical properties and service safety of automotive wheels. Therefore, controlling casting defects effectively not only is a product quality issue but also impacts the safety of the entire vehicle. The influence of the low-pressure casting process on shrinkage pores is systematically studied and summarized in this paper. To predict the generation of shrinkage porosity defects in low pressure casting hubs, the effects of process parameters such as pouring temperature, mold preheating temperature, filling rate and holding pressure on the formation of shrinkage porosity were studied. The results show that increasing the pouring temperature and mold preheating temperature increases the filling capacity and reduces the shrinkage porosity to a certain extent. However, overheating the mold or a super high pouring temperature will lead to the opposite effects. In addition, slower filling at the laminar stage significantly reduces the shrinkage porosity on the premise of successful filling, and a high holding pressure helps with closing the pores.

Key words: automobile wheel; low-pressure casting; Al alloy; shrinkage porosity; finite element method

1 低压铸造铝合金轮毂研究现状

在乘用车领域, 铝合金轮毂相对于传统的钢制轮毂, 有效地减轻了簧下重量、提高了安全可靠性的^[1-2], 目

前, 铝合金铸造材料中, 经过 T6 热处理的 A356 铝合金由于其可在铸性、强度和延展性方面表现出较佳的综合性能, 应用最为广泛^[3]。然而, 汽车轮毂的质量取决于制造过程中的缺陷控制水平。

收稿日期: 2023-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(52073030); 国家自然科学基金-广西联合基金(U20A20276)

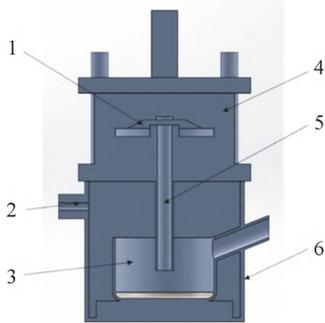
作者简介: 李钟尧, 2000 年生, 硕士, 研究方向为铸造工艺仿真与缺陷预测研究. Email: 3220222251@bit.edu.cn

通讯作者: 王俊升, 1979 年生, 博士, 教授, 研究方向为轻质铝合金、镁合金的设计开发以及材料集成计算. E-mail: junsheng.wang@bit.edu.cn

引用格式: 李钟尧, 吴雪龙, 苗以升, 等. 低压铸造铝合金轮毂工艺参数对缩孔缺陷的影响[J]. 铸造技术, 2024, 45(2): 163-172.

LIZ Y, WU X L, MIAO Y S, et al. Effects of low-pressure casting processes on shrinkage porosity formation in Al alloys[J]. Foundry Technology, 2024, 45(2): 163-172.

低压铸造属于反重力铸造^[4],是铝合金轮毂最主要的生产工艺^[5],低压铸造生产的轮毂占汽车轮毂产量的90%以上,它的基本原理如图1所示。在生产过程中,高温金属液由坩埚压入升液管,自下而上充满型腔,并在一定保压压力下完成凝固。



1- 型腔;2- 输气管;3- 坩埚;4- 金属模;5- 升液管;6- 保温炉

图1 低压铸造基本原理图

Fig.1 Schematic diagram of low-pressure casting

然而,随着新能源汽车的快速发展,复杂结构的轮毂对低压铸造工艺的可靠性提出了新的挑战,制造过程中产生的局部晶粒粗大、缩孔缩松、气孔等,直接影响轮毂的服役安全性^[6]。

目前,针对低压铸造缺陷的研究,多是应用 ProCAST 软件或其他铸造仿真软件,通过数值仿真的方式研究,并且进行工艺优化来控制孔隙以及其他缺陷的形成。另外,利用 XCT、SEM 等技术,以实验的方式研究包括孔洞、SDAS(secondary dendrite arm spacing)、共晶组织在内的微观组织也是主流方法。如樊超等^[7]为了减少转向节铸造过程中的缩孔缺陷,优化了浇注系统的结构,并通过 ProCAST 验证了优化后工艺系统的效果。Sun 等^[8]针对低压铸造发动机曲轴箱顶部平面的气孔缺陷,结合显微计算和数值仿真,发现这种缺陷是由充型紊流携带折叠氧化物和卷气引起。Mi 等^[9]通过 ProCAST 进行低压铸造轮毂的数值仿真,研究了充型与凝固过程,发现在无人控制时,轮毂的凝固不是从轮缘到轮辐的顺序凝固,并通过增加冷却管的方式实现了轮毂的顺序凝固,降低了缺陷数量。Dhisale 等^[10]为低压

铸造轮毂模具设计了多条冷却管,基于不同的冷却管条件,如冷却介质、流速进行研究。并使用多学科设计优化算法,以各冷却管的启动时间、关闭时间为变量,以铸件缩孔率为优化目标,得到了最佳的冷却方案。Dong 等^[11]通过控制铸造工艺系统中冷却管的流量以及保压时间了解缺陷的形成趋势,结合仿真与实验,研究了铸造缺陷、微观组织形貌、共晶 Si 分布对铸件机械性能的影响。Timelli 等^[12]研究了发动机缸体的低压铸造过程,发现在较高保压压力下得到的铸件缩孔率更小,并且缩孔的平均尺寸和圆度都有所下降。Gu 等^[13]选取楔形铸件,从窄壁到厚壁均匀分布的具有不同冷速的位置进行 XCT 实验,发现了高冷却速率会使铸件缩孔率下降,同时孔洞数量小幅上升。

Kim 等^[14]开发了一个基于3种数据分析算法的缺陷预测及诊断模型,包括“预热阶段诊断模型”“缺陷预测模型”及“缺陷成因诊断模型”。其中“缺陷预测模型”运用随机森林算法,建立了从铸造参数到铸造缺陷的关系,可以预测一个铸件是否将会产生缺陷以及将会产生缺陷的种类。Duan 等^[15]利用多输入、多输出神经网络建立了一种先进的机器学习策略,用来设计针对大型复杂薄壁铸件的低压铸造补缩工艺系统,减少铸造过程中因补缩不足而产生的缩孔缩松。

对于影响低压铸造铸件缺陷的各因素,如浇注温度、模具预热温度、充型压力、保压压力,对缺陷的影响规律鲜有报道。本文基于 ProCAST 开展数值仿真,研究浇注温度、模具预热温度、充型速率、充型压力、保压压力对低压铸造铸件缩孔缩松缺陷的影响规律。

2 仿真边界条件与仿真参数设置

2.1 轮毂三维模型构建

利用 SolidWorks 软件建立了轮毂三维模型,如图2所示,轮毂直径410 mm(约16英寸),宽150 mm(约6英寸)。

通过 VisualMesh 将三维模型划分了有限元网

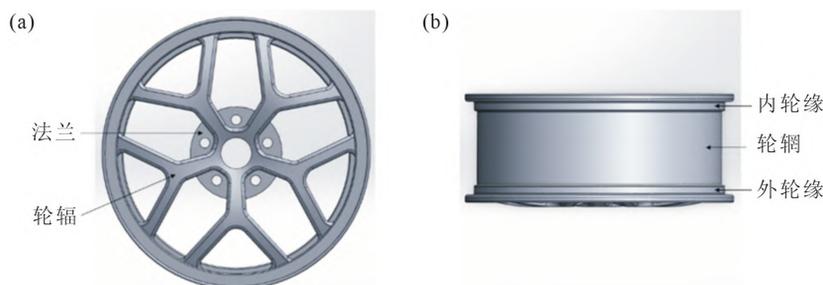


图2 铝合金轮毂三维模型:(a)俯视图,(b)正视图

Fig.2 3D model of the aluminum alloy wheel hub: (a) top view, (b) front view

格,并建立了简化的三维箱体包裹轮毂模型,其尺寸为 600 mm×600 mm×350 mm,如图 3 所示,其中,图 3a 为轮毂与金属模的线框模型,图 3b 为轮毂的表面模型。

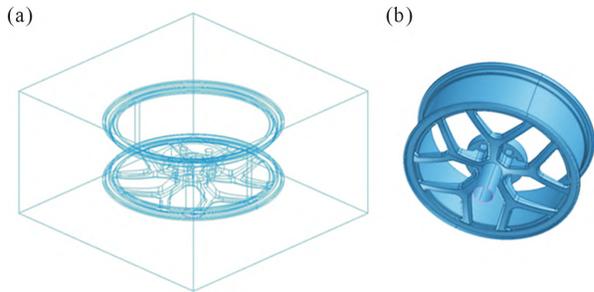


图 3 VisualMesh 中的轮毂与金属模模型:(a) 金属模模型, (b) 轮毂模型
Fig.3 Wheel hub and metal die model in VisualMesh: (a) metal die, (b) hub

2.2 边界条件与参数设置

2.2.1 重力方向设置

低压铸造工艺为反重力铸造,金属液在压力的驱动下对抗重力,从升液管进入型腔,重力方向应从轮毂内侧到轮毂外侧。重力设置如图 4 所示。

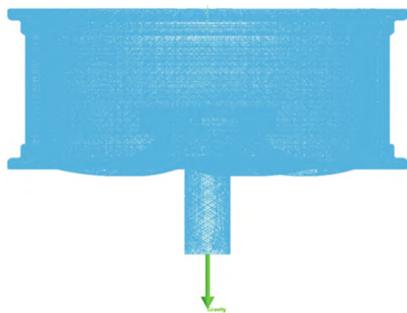


图 4 重力方向设置
Fig.4 Gravity direction setting

2.2.2 材料设置

目前,在低压铸造铝合金轮毂领域常用的合金为 A356.2 铝合金,其化学成分如表 1 所示^[16-17]。在 VisualCast 数据库中的 A356 合金,其具体化学成分如表 2 所示。金属模材料为 H13 模具钢。H13 系列模具钢化学成分和 VisualCast 数据库中 H13 模具钢具体化学成分分别如表 3~4 所示^[18]。

表 1 A356.2 铝合金化学成分^[16-17]
Tab.1 Chemical composition of the A356.2 aluminum alloy^[16-17]

(mass fraction/%)							
Si	Mg	Ti	Fe	Mn	Cu	Zn	Al
6.5~7.5	0.30~0.45	≤0.2	≤0.12	≤0.05	≤0.1	≤0.05	Bal.

表 2 VisualCast 数据库中 A356 铝合金具体化学成分
Tab.2 Chemical composition of A356 aluminum alloy in the VisualCast database

(mass fraction/%)							
Si	Mg	Ti	Fe	Mn	Cu	Zn	Al
7	0.3	≤0.2	≤0.12	≤0.05	≤0.1	≤0.05	Bal.

表 3 H13 系列模具钢化学成分^[18]
Tab.3 Chemical composition of the H13 steel^[18]

(mass fraction/%)							
C	Cr	Mn	Mo	Si	V	P	S
0.32~0.45	4.75~5.50	0.2~0.5	1.10~1.75	0.8~1.2	0.8~1.2	≤0.03	≤0.03

表 4 VisualCast 数据库中 H13 模具钢的具体化学成分
Tab.4 Chemical composition of H13 steel in the VisualCast database

(mass fraction/%)							
C	Cr	Mn	Mo	Si	V	P	S
0.405	5.125	0.35	1.425	1	1	≤0.03	≤0.03

2.2.3 换热系数设置

选择轮毂与金属模之间的表面,并设置换热系数为 ProCAST 数据库提供的 A356 合金与 H13 工具钢之间的换热系数。

2.2.4 边界条件设置

金属型外部施加空气冷却边界条件,在升液管入口处施加压力边界条件,如图 5 所示。

在低压铸造中压力一般为一条压力曲线,对于这条曲线,第 1 段为一次曲线,从参考压力 P_r (reference pressure)开始上升到 P_r+P_m ,其中 P_r 通常为 1 一个大气压, P_m 为金属液静压力 (metalostatic pressure),通过下式计算获得:

$$P_m = \rho gh \quad (1)$$

式中, ρ 为金属液密度, kg/m^3 ; h 为型腔高度, m ; g 为重力加速度。

压力达到金属液静压力时对应的时间是充型时间,在曲线前增加小段时间延迟,能够让 ProCAST

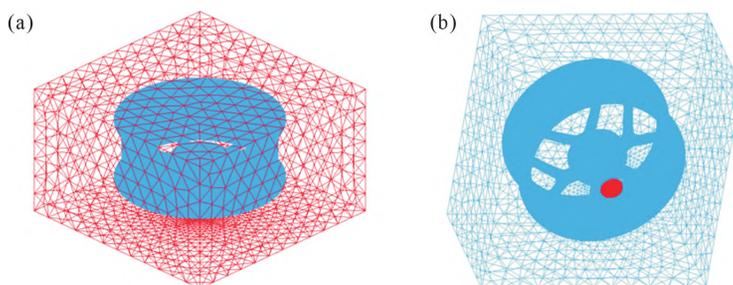


图 5 施加边界条件的区域:(a) 金属型外部,(b) 升液管入口
Fig.5 Areas imposed by boundary conditions: (a) external surface of the metal die, (b) inlet of the rise tube

软件在一小段时间后再开始考虑压力的影响,逐步增大计算量,得到更平滑的计算结果,如图6所示。之后进行升压进入保压阶段,取 $\rho=2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, g=9.8 \text{ N/kg}, h=(150+100) \times 10^{-3} \text{ m}$, 经计算,金属液充满型腔所需的金属液静压力为 6 370 Pa,即 6.37 kPa。金属液充满升液管 ($h=100 \times 10^{-3} \text{ m}$) 所需压力为 2 548 Pa,约为 2.55 kPa。

升压压力一般选择金属液静压力的 1.3~2.0 倍,即 8.28~12.74 kPa,本文选择升压压力为 10 kPa。

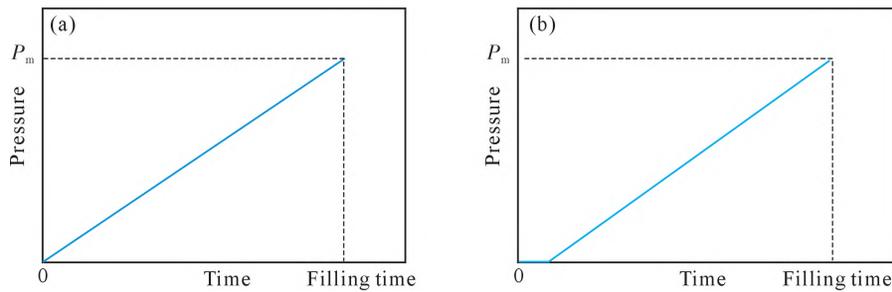


图6 压力曲线起始阶段:(a)不添加延迟,(b)添加小段延迟
Fig.6 Initial stage of pressure curve: (a) without delay, (b) considering a short delay

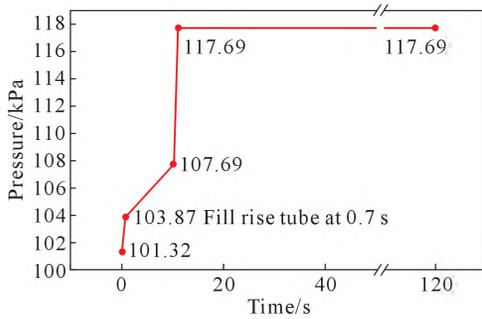


图7 完整压力曲线
Fig.7 Complete pressure curve

卸压,使未凝固的金属液回落到坩埚中。但本仿真设置结束判据为:所有节点的温度都低于金属液固相线时即会停止仿真,所以在压力曲线中未表现出卸压阶段。

2.2.5 仿真参数设置

在低压铸造仿真中,仿真参数设置、调整如下:流场和温度场计算模型在仿真中有两种模型可供选择,分别为全程计算温度场及流场,以及在充型完成后凝固阶段转为只计算温度场。本文中的仿真在充型阶段和凝固阶段都同时考虑温度场和流场,因此选择前者。

在仿真计算中,可以选择通过质量流量、金属液流速或压力来驱动金属液充型。使用质量流量或金属液流速驱动充型时,金属液充满型腔的时间将不再由压力曲线控制。因此,使用压力驱动充型,能够更好地研究压力对铸件质量的影响。

仿真中将要使用的自由面模型,分为主要考虑

为了保证更平稳的充型,为压力曲线设置一个快速升液阶段,在 0.7 s 时使金属液快速充满升液管,然后放缓增压速度,在指定时间达到型腔的金属液静压力。以充型时间 10 s、增压压力 10 kPa、增压时间 1 s 为例,完整的压力曲线如图 7 所示。

在以温度为变量的仿真实验组中,将使用图 7 所示的压力曲线;在以压力为变量的仿真实验组中,图 7 所示的压力曲线会在充型时间、增压时间方面有所更改。在工艺上,金属液在型腔完成凝固后将会

冲量的快速充型模型和主要考虑重力的缓慢充型模型。经过小型仿真验证,总结出冲量为主的自由面模型与重力为主的自由面模型计算结果具有以下特点:冲量为主的自由面模型对升液管入口施加的压力更加敏感,而重力为主的自由面模型将忽略压力的变化,控制金属液非常平稳地上升充型。为了不影响压力对仿真结果的作用,使用主要考虑冲量的快速充型模型。

3 仿真结果

3.1 网格尺寸对仿真结果的影响

在有限元分析中,网格划分的质量直接关系到分析的时间与结果的正确性、精确性。在合理的网格划分方案下,网格划分一般是越精细越好,仿真的精确程度随着网格数量的上升而上升,但当网格数量达到一定值后,精度增加幅度减小,与之相对的,计算成本和时间会大幅增加。为选定最合适的网格尺寸,进行 4 组仿真实验,对浇注温度、模具预热温度、充型速率、充型压力、保压压力的仿真都基于本节网格划分仿真结果。

对轮毂模型分别进行了 3、6、9、12 mm 的网格划分,如图 8 所示,不同网格尺寸下的面网格数、体网格数以及仿真用时如表 5 所示。

疏松区域的仿真结果如图 9 所示。在 3 mm 网格划分仿真实验中(图 9a),缩孔集中区域的表现形式为聚集起来的细小区域。而在更大网格划分的仿真实验中(图 9b~d),缩孔集中区域的表现形式则为

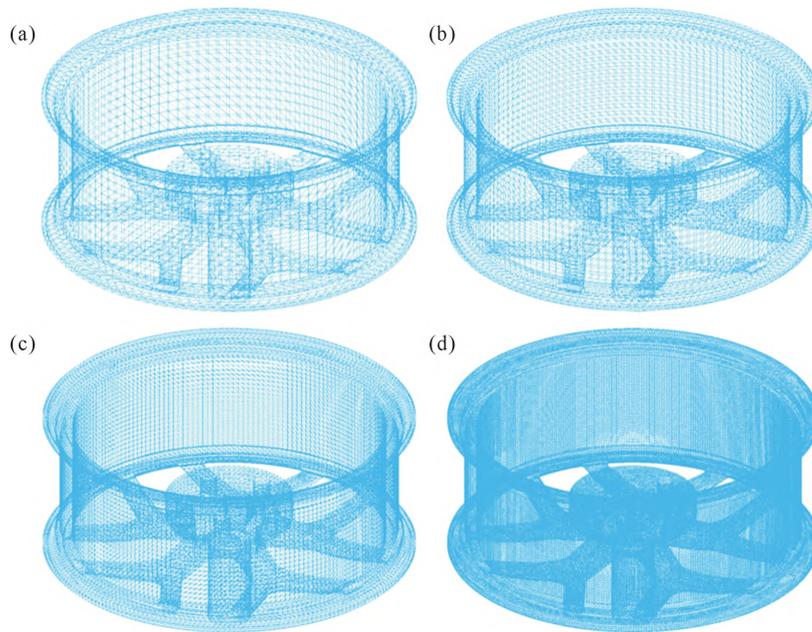


图8 不同网格尺寸划分所得的结果:(a) 12 mm, (b) 9 mm, (c) 6 mm, (d) 3 mm
Fig.8 Results for different mesh size divisions: (a) 12 mm, (b) 9 mm, (c) 6 mm, (d) 3 mm

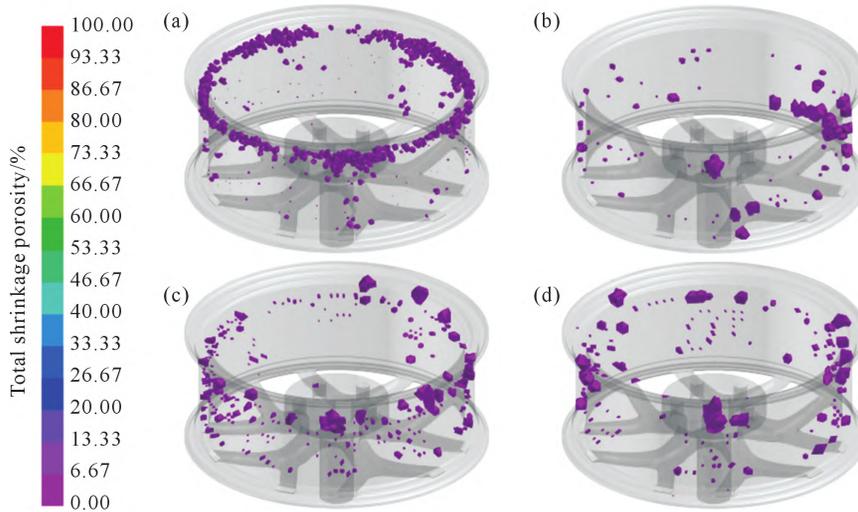


图9 网格划分仿真实验结果:(a) 3 mm, (b) 6 mm, (c) 9 mm, (d) 12 mm
Fig.9 Simulation results for different mesh size divisions: (a) 3 mm, (b) 6 mm, (c) 9 mm, (d) 12 mm

表5 不同尺寸下的网格数量与仿真用时
Tab.5 The number of grids and simulation time with different sizes of grids

网格尺寸	面网格数	体网格数	仿真用时
3 mm	174 730	4 810 913	7 h13 min
6 mm	47 904	793 496	35 min
9 mm	24 894	366 814	9 min
12 mm	16 242	210 418	5 min

一块或几块大区域集合在一起,针对非缩孔敏感区域的孤立缩孔缺陷,如轮辋上的分散微小缩孔,3 mm 网格的仿真结果更加精确,而更大尺寸的网格仿真中则可能会缺掉这些微小的缩孔缺陷。

可以看出,网格划分越密,对缩孔缩松的预测结果越趋近于聚集起来的很多小区域、越是精细。但当进一步精细化网格至 2 mm 时,创建面网格已经非

常困难,划分体网格的计算量也非常大。因此,综合考虑仿真精度与仿真时间,在对目标参数进行研究时,采用 3 mm 网格进行仿真实验。

针对铸型的网格划分,开展了一系列测试,发现采用 50 mm 网格既能够反映型腔的结构,同时不影响边界条件的加载。

3.2 浇注温度对缩孔缺陷的影响

为研究浇注温度对缩孔缺陷的影响,进行了 7 组仿真实验。仿真参数如表 6 所示。

7 次仿真实验的缩孔分布如图 10 所示,从左上开始依次为 1~7 号仿真结果。

统计 7 次仿真实验的缩孔体积,如图 11 所示。结合图 10~11 分析,缩孔体积随温度上升呈现先降后升的趋势,从 650~700 °C 下降幅度最大,在 725 °C

表 6 浇注温度对缩孔缺陷的影响
Tab.6 Simulation experiment on the relationship between the pouring temperature and shrinkage defect

实验号	1	2	3	4	5	6	7
浇注温度 /℃	650	675	700	712.5	725	737.5	750

附近某一温度达到极小值。不仅如此,在温度达到极小值之前,缩孔发生区域,集中在轮毂内轮缘附近,随着温度达到极小值并超过极小值点,缩孔发生区域从内轮缘附近向外发展,最终接近外轮缘。

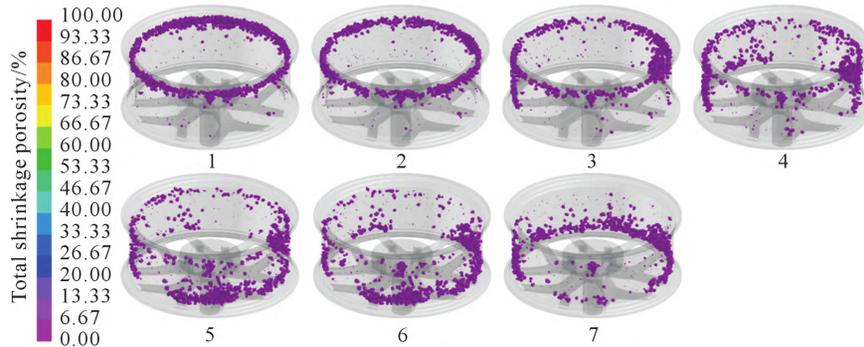


图 10 不同浇注温度下的缩孔分布图

Fig.10 Distribution of shrinkage defects with different pouring temperatures

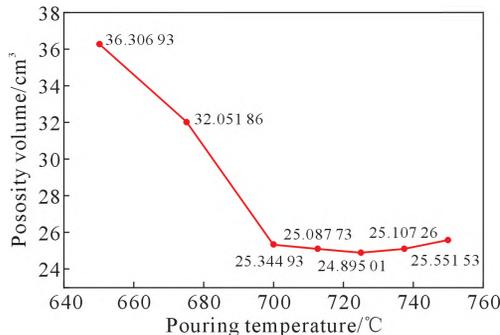


图 11 浇注温度-缩孔体积曲线

Fig.11 Relationship between the pouring temperature and volume of shrinkage defects

同时,过高的浇注温度会使金属液在凝固过程中收缩加大,易使铸件产生缩孔或缩松、热裂^[20],同时还会引起金属的氧化、晶粒粗大等缺陷。

在仿真结果中,浇注温度为 650℃时,金属液充型困难,仿真得到的缩孔体积最高,随着浇注温度逐渐增高,金属液流动性增加,获得了更好的充型能力,缩孔体积从 650~700℃迅速下降,然后缓慢下降,直到浇注温度到达 725℃附近的极小值点。在这之后,高浇注温度带来的金属液充型能力提高幅度减小,取而代之的是收缩加大,缩孔体积又开始缓慢上升。仿真结果与目前的理论相符。

3.3 模具预热温度对缩孔缺陷的影响

为研究模具预热温度对缩孔缺陷的影响,控制浇注温度为 700℃,进行了 8 组仿真实验。仿真实验安排如表 7。

浇注温度是影响铸造质量的重要因素,其对金属液的充型能力有决定性的影响。一般来说,金属液的浇注温度应高于合金液相线 50~100℃,即过热度为 50~100℃。低于合适范围的浇注温度会使金属液的流动性变差^[19],进而使金属液的充型能力减弱,更难填充型腔,产生冷隔、浇不足、夹渣和疏松等缺陷。

较高的浇注温度可使金属液获得更好的充型能力,但当浇注温度升高超过某一界限时,由于吸气多、氧化严重,金属液充型能力的提升幅度会减小。

表 7 模具预热温度对缩孔缺陷的影响

Tab.7 Simulation experiment on the relationship between the die preheating temperature and shrinkage defect

实验号	1	2	3	4	5	6	7	8
模具温度/℃	200	300	350	400	425	450	475	500

8 次仿真实验的缩孔分布如图 12 所示,从左开始依次为 1~8 号仿真结果。统计 8 次仿真实验的缩孔体积,如图 13 所示。结合图 12~13 分析,缩孔体积随着模具预热温度的上升呈先降后升的趋势,在模具预热温度为 350℃附近时达到极小值点。同时,模具预热温度从 200℃增加到 500℃的过程中,缩孔分布的集中区域从轮毂内轮缘向轮毂外轮缘移动,这与浇注温度从 650℃增加到 750℃时,缩孔分布的变化规律相似。

模具预热的意义是减小金属液与铸型之间的温差,可以防止先进入型腔的金属液过早开始凝固,影响后续充型过程,同时提高金属液的流动性和充型能力,一般金属型铸造的模具预热温度不低于 150℃。模具预热温度主要从两个方面影响铸件的缩孔缺陷:金属液的充型能力和铸件的冷却速率。模具预热温度从低到高的过程中,金属液的充型能力逐渐提高,同时凝固阶段冷却速率降低,前者会使缩孔产生的概率减小,后者则会使缩孔出现的概率增大。

曾礼等^[21]利用 Niyama 判据对轮毂的缩孔缺陷进行研究,针对铸件辐条处缩松倾向的最大位置,将冷却速率从 1.063 2℃/s 提高到 3.179 7℃/s,相应

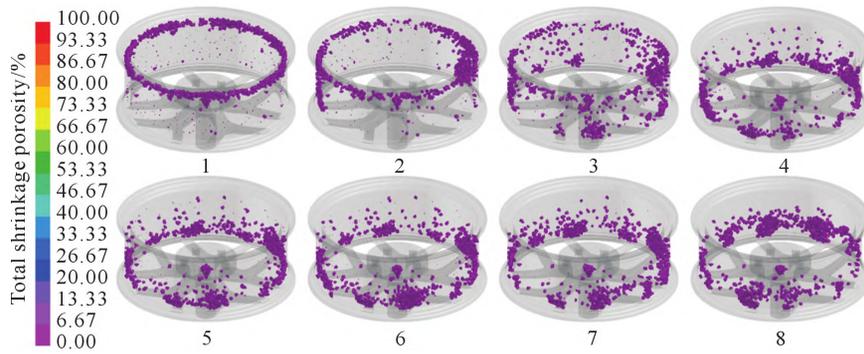


图 12 不同模具预热温度下的缩孔分布图

Fig.12 Distribution of shrinkage defects with different mold preheating temperatures

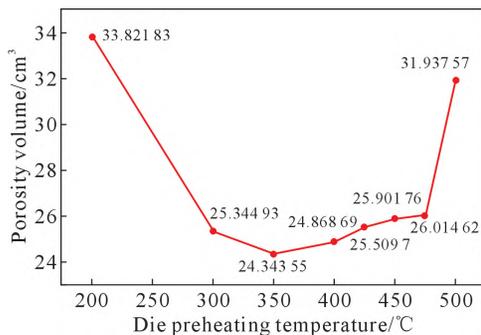


图 13 模具预热温度-缩孔体积曲线

Fig.13 Relationship between the mold preheating temperature and volume of shrinkage defects

的,Niyama 判据由 0.82 增加到 19.24。增加冷却速率后,辐条中缩孔缩松数量大幅度减少。Gu 等^[13]报道了当冷却速率从 2.5 K/s 上升到 64.8 K/s 时,缩孔率从 0.6% 下降到 0.035%,同时孔洞数量从 44 小幅上升到 67。

结合仿真实验结果,可以看出,本次低压铸造仿真中,充型能力和冷却速率对缩孔缺陷的影响能力在 350 °C 附近的极小值点达到平衡,在此之前,充型能力提高对缩孔的影响能力更大,轮毂中的缩孔体积逐渐下降,而当模具预热温度越过极小值点,冷却速率降低对缩孔的影响占据主导,使轮毂的缩孔体积升高。

3.4 充型过程对缩孔缺陷的影响

对充型过程的研究从两个方面进行:充型速度以及充型压力。为了更好地研究压力因素的影响,在研究充型与保压的仿真中控制浇注温度为 700 °C、模具预热温度为 400 °C,减小冷却速率,以避免当充型较慢时金属液过早开始凝固。

充型速度是影响低压铸造铸件质量的关键工艺因素,其是通过施加给坩埚中熔融金属液的压力来控制的。工艺上需要保持充型的平稳^[11],不当的充型速度会导致铸件质量低下。研究充型速度时,以加压达到金属液静压力的时间为变量,延长充型时间既减小充型速度。如表 8 所示,令充型压力分别在 7.5、

表 8 充型速度对缩孔缺陷影响的仿真实验
Tab.8 Simulation experiment on the relationship between the filling rate and shrinkage defect

实验号	1	2	3	4	5	6
充型时间/s	7.5	10	12.5	15	17.5	20

10、12.5、15、17.5 和 20 s 达到金属液静压力,再以相同的增压速度 10 kPa/s 增压 1 s,开始保压。

研究充型速度对缩孔缺陷影响的压力曲线如图 14 所示。仿真实验得到的缩孔分布如图 15 所示,从左开始依次为 1~4 号仿真。5 号、6 号仿真充型失败,1~4 号仿真得到的缩孔体积如图 16 所示。随着充型时间的增加,充型过程会更加缓慢平稳,减少了紊流、卷气冲击铸型的可能,使得缩孔的产生明显减少。但当充型时间太长,从 17.5 s 开始,出现了欠充型的现象,金属液未能上升到铸型的顶端,当充型时间为 17.5 s 和 20 s 时,金属液上升高度分别为型腔的 80% 和 70% 左右。

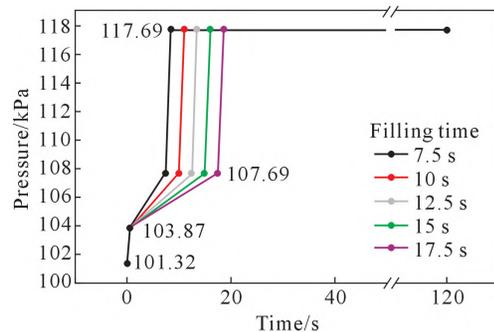


图 14 充型时间-充型压力曲线

Fig.14 Relationship between the filling time and pressure

更快的充型速率会使铸型/型腔边界处的热量散失减少,进而导致更慢的冷却速率和更长的冷却时间,与平滑缓慢地加压相比,会导致微观结构中的晶粒粗大。除此之外,充型速率过快,使金属液产生紊流,还可能产生氧化膜、铁豆缺陷^[12]。

研究充型压力对缩孔缩松缺陷的影响时,先开始 1 次仿真实验:使压力在 15 s 时达到金属液静压力,然后于 5 s 内增压 50 kPa 开始保压。第 2 次仿真

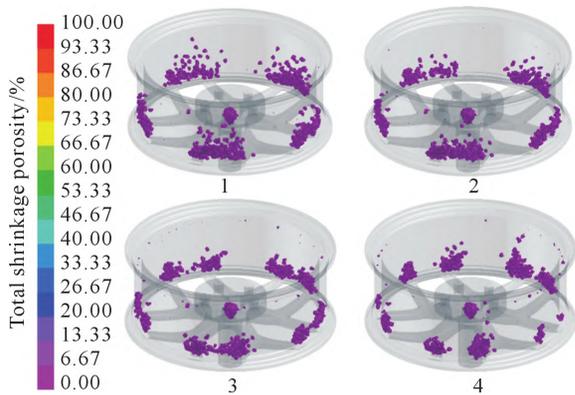


图 15 充型时间-缩孔分布图

Fig.15 Distribution of shrinkage defects with different filling time

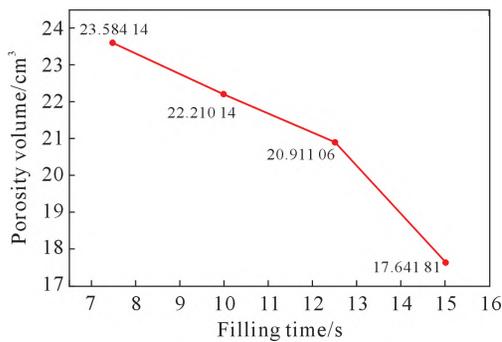


图 16 充型时间-缩孔体积曲线

Fig.16 Relationship between the filling time and volume of shrinkage defect

使压力在 15 s 时达到两倍的金属液静压力,然后于 20 s 时增压 50 kPa 开始保压。该次仿真除了 15 s 时压力不同,压力曲线上其他时间点的压力值都连续,且与上一次仿真的压力值相同。

仿真完成后发现,当施加压力在 15 s 时达到 2 倍的金属液静压力,实际上型腔在 7.615 s 便完成了充型,如图 17 所示。这是因为施加的压力在这个时间已经达到了足以使金属液充满型腔的压力值,相当于提高了充型速率。增加充型压力最终会影响到充型的速率。

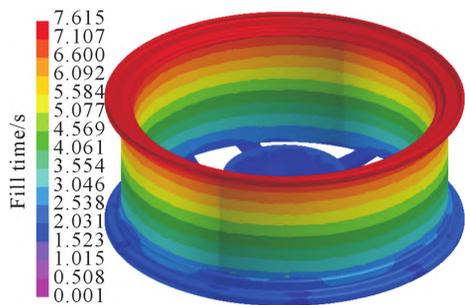


图 17 充型压力为 2 倍金属液静压力的充型完成时间

Fig.17 Filling time in filling pressure experiments with a filling pressure twice the metallostatic pressure

两次仿真得到的缩孔体积分别为 17.816 133 cm³

和 23.980 418 cm³,比较发现高充型压力实际上等价于更快的充型速率,使缩孔体积上升,符合充型速率部分仿真所得的结果。

3.5 保压压力对缩孔缺陷的影响

对低压铸造保压阶段的研究,一般选择 1.3~2.0 倍的金属液静压力进行保压,研究不同的保压时间对铸件品质的影响。由于低压铸造设备以及工艺的限制,保压压力一般在 100 kPa 以下,为了研究保压压力的影响,在仿真实验中选用更高的保压压力。仿真实验如表 9 所示。

表9 保压压力对缩孔缺陷的影响

Tab.9 Simulation experiments on the relationship between holding pressure and shrinkage defects

实验号	1	2	3	4	5
保压压力/kPa	10	50	90	180	270

15 s 时加压至金属液静压力完成充型,之后固定加压速率为 10 kPa/s,直至达到预定的保压压力。该实验中应用的压力曲线如图 18 所示。

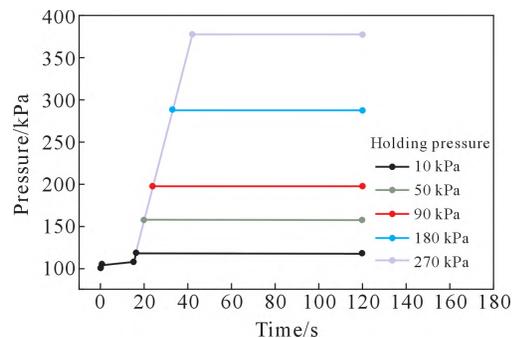


图 18 时间-保压压力曲线

Fig.18 Relationship between the time and holding pressure

仿真得到的缩孔分布如图 19 所示,从第一行开始为 1~5 号仿真。缩孔体积结果如图 20 所示。增加保压压力的过程中,缩孔分布区域没有变化,数量稍微减少。除了 10 kPa 保压压力之外,当保压压力从 50 kPa 增加到 270 kPa,铸件的缩孔体积从 17.816 13 cm³ 降低到 16.972 25 cm³,呈现出明显的下降趋势。而保压压力为 10 kPa 时与总体趋势不符,其中原因尚不明确。

保压压力从两个方面影响缩孔的产生:①高压使得枝晶臂之间的金属液填充能力增加,补缩更容易,产生的结构更致密;②高保压压力使金属液与金属型充分接触强化了传热,增大了冷却速率,使缩孔减少。田学雷等^[22]基于 Niyama 判据 $G\sqrt{R}$,引入金属液静压力,推导出考虑金属液静压力 P_0 的缩松预测判据 $P_0G\sqrt{R}$,并提出当金属液的压力能够克服补缩的阻力,达到需要补缩的位置时,则不产生缩松,仿真结果也印证了这一观点。同时,更高的保压

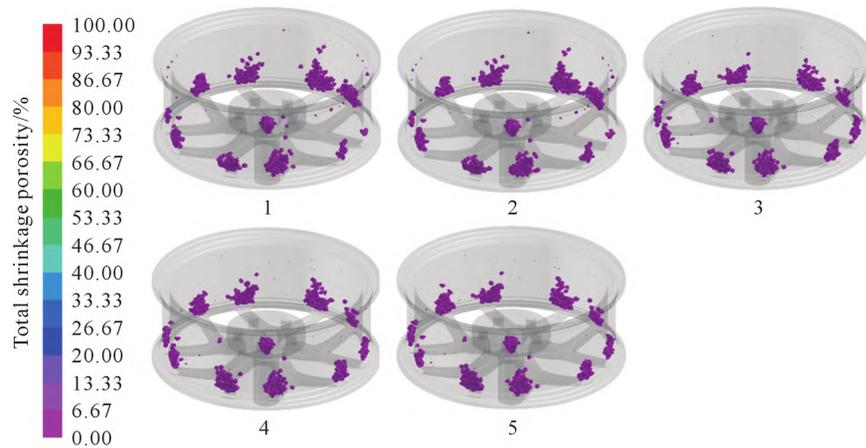


图 19 保压压力-缩孔分布

Fig.19 Distribution of shrinkage defects with different holding pressures

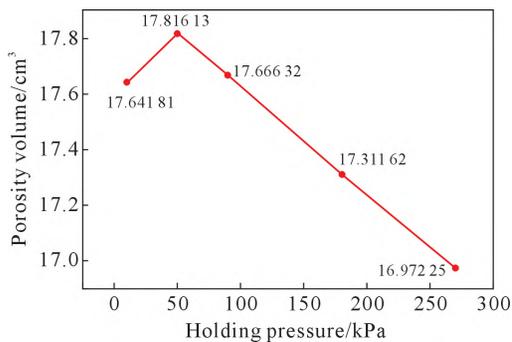


图 20 保压压力-缩孔体积曲线

Fig.20 Relationship between the holding pressure and volume of shrinkage defects

压力还能够产生更小的平均晶粒尺寸,使铸件密度增加,增强铸件的机械性能^[23]。ZHANG 等^[24]使用 CA 模型进行铝合金铸件凝固模拟,发现高压可以促进孔洞闭合,并用 XCT 实验验证了模拟结果。Timelli 等^[12]研究了发动机缸的低压铸造过程,发现在 0.035 MPa 保压压力下得到的铸件缩孔率在 0.3%~0.5%之间,而在 0.05 MPa 保压压力下得到的铸件缩孔率在 0.1%~0.4%之间,并且缩孔的平均尺寸和圆度都有所下降。

4 结论

(1)随着浇注温度的上升,金属液的充型能力提高,在一定范围内,缩孔缺陷减少,但当浇注温度过高,金属液的凝固收缩加大,同时充型能力提高幅度变小,缩孔缺陷开始增多。

(2)提高金属型的预热温度,一方面可以增加金属液的充型能力,防止它过早开始凝固,另一方面会使凝固时金属液的冷却速率降低。在这两个因素的共同作用下,缩孔缺陷随着铸型温度的升高呈现先降后升的趋势。

(3)充型时间的改变与充型压力的改变(充型压

力应大于型腔的金属液静压力以保证能够完成充型),本质上是改变了充型速率。充型越缓慢平稳,缩孔出现的概率越低,但充型速率不能过慢,否则会导致欠充型的情况。

(4)高保压压力增强了凝固阶段金属液的补缩能力,同时增大了冷却速率,使缩孔缺陷减少。

参考文献:

- [1] 张世琪,吴国瑞,黄金,等. 浅析汽车轻量化铝合金轮毂的生产工艺[J]. 内燃机与配件, 2022(24): 76-78.
ZHANG S Q, WU G R, HUANG J, et al. Analysis on the production process of lightweight aluminum alloy wheels for automobiles [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2022(24): 76-78.
- [2] 蒋建平,蒋晶. 浅析汽车安全新技术与道路交通安全[J]. 绿色科技, 2013(11): 213-215.
JIANG J P, JIANG J. Simple analysis on new technology of automobile safety and traffic safety[J]. Journal of Green Science and Technology, 2013(11): 213-215.
- [3] KONG D C, SUN D Z, YANG B C, et al. Characterization and modeling of damage behavior of a casting aluminum wheel considering inhomogeneity of microstructure and microdefects[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 145: 107018.
- [4] 廖可,舒惠明,万慧,等. 低压铸造在大型复杂薄壁结构铝合金铸件的工艺研究[J]. 科技创新与应用, 2017(30): 78-79, 81.
MIU K, SHU H M, WAN H, et al. Research on process of low pressure die cast in large, complex thin-walled aluminum castings [J]. Technology Innovation and Application, 2017(30): 78-79, 81.
- [5] 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, 50(9): 10-15.
REN K, FENG L C, SUN L, et al. Research status of low pressure casting aluminum alloy wheels[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(9): 10-15.
- [6] 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.

- [7] 樊超,于大威,王虎明,等. 基于铸造 CAE 仿真技术的铸钢件工艺优化研究与应用[J]. 铸造技术,2022,43(10): 929-934. FAN C, YU D W, WANG H M, et al. Research on steel process optimization based on CAE simulation casting technology [J]. Foundry Technology, 2022, 43(10): 929-934.
- [8] SUN J, LE Q, FU L, et al. Gas entrainment behavior of aluminum alloy engine crankcases during the low-pressure-die-casting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 266: 274-282.
- [9] MI G F, LIU X Y, WANG K F, et al. Numerical simulation of low pressure die-casting aluminum wheel [J]. China Foundry, 2009, 6(1): 48-52.
- [10] DHISALE M, VASAVADA J, TEWARI A. An approach to optimize cooling channel parameters of low pressure die casting process for reducing shrinkage porosity in aluminium alloy wheels[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 3189-3196.
- [11] DONG G J, LI S D, MA S Z, et al. Process optimization of A356 aluminum alloy wheel hub fabricated by low-pressure die casting with simulation and experimental coupling methods [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 3118-3132.
- [12] TIMELLI G, CALIARI D, RAKHMONOV J. Influence of process parameters and Sr addition on the microstructure and casting defects of LPDC A356 alloy for engine blocks[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(6): 515-523.
- [13] GU C, LU Y, LUO A A. Three-dimensional visualization and quantification of microporosity in aluminum castings by X-ray micro-computed tomography[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 65: 99-107.
- [14] KIM J S, KIM J, LEE J Y. Die-casting defect prediction and diagnosis system using process condition data[J]. Procedia manufacturing, 2020, 51: 359-364.
- [15] DUAN Z Q, CHEN W P, PEI X L, et al. A multimodal data-driven design of low pressure die casting gating system for aluminum alloy cabin[J]. Journal of materials research and technology, 2023, 27: 2723-2736.
- [16] 程颖,洪涛,魏怀远,等. 返回料及精炼工艺对 A356 铝合金净化效果的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(11): 1325-1330. CHENG Y, HONG T, WEI H Y, et al. Influence of recycled material and refining process on purification of A356 aluminum alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(11): 1325-1330.
- [17] 张超群,杨子旋,彭文飞,等. 共晶 Si 形貌对 A356 铝合金动态、准静态压缩力学性能及氢脆的影响[J]. 材料导报,2023,37(Z1): 414-419. ZHANG C Q, YANG Z X, PENG W F, et al. Effect of eutectic Si morphology on dynamic and quasi-static compression mechanical properties and hydrogen embrittlement of A356 aluminum alloy [J]. Materials Reports, 2023, 37(Z1): 414-419.
- [18] 吕桂清,唐开明. H13 和 DFD 钢丝的淬火—回火工艺研究[J]. 金属制品,2004(1): 5-7. LV G Q, TANG K M. Quench-temper process research of H13 and DFD steel wire[J]. Steel Wire Products, 2004(1): 5-7.
- [19] 熊明辉. 铝合金压铸件充型凝固过程及其压铸工艺 CAE 分析 [J]. 热加工工艺,2013,42(15): 63-65, 67. XIONG M H. CAE technology on filling solidification processes and die casting process of aluminum alloy die casting [J]. Hot Working Technology, 2013, 42(15): 63-65, 67.
- [20] 胡增武,宗福春. 化学成分和浇注温度对 7A04 合金铸造性能的影响[J]. 铸造,2023,72(3): 270-274. HU Z W, ZONG G C. Effect of composition and pouring temperature on casting properties of 7A04 aluminum alloy [J]. Foundry, 2023, 72(3): 270-274.
- [21] 曾礼,赵建华,宋刚. 利用 Niyama 判据预测重力铸造铝合金摩托车车轮缺陷[J]. 特种铸造及有色合金,2011,31(9): 807-811. ZENG L, ZHAO J H, SONG G. Application of Niyama criterion in the shrinkage porosity prediction of metal mold gravity casting aluminum alloy motorcycle wheel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2011, 31(9): 807-811.
- [22] 田学雷,刘志勇,李光友,等. 金属液压力对疏松预测的影响[J]. 中国铸造装备与技术,2001(4): 9-11. TIAN X L, LIU Z Y, LI G Y, et al. The effect of liquid metal pressure on the prediction of shrinkage porosity[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2001(4): 9-11.
- [23] FU P H, LUO A A, JIANG H Y, et al. Low-pressure die casting of magnesium alloy AM50: Response to process parameters[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1-3): 224-234.
- [24] ZHANG Y, XUE C, YANG X, et al. Uncovering the effects of local pressure and cooling rates on porosity formation in AA2060 Al-Li alloy[J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 106384.