

稀土镁合金汽车轮毂低压铸造工艺数值模拟研究

李媛¹ 何伟^{2,3} 胡文鑫^{2,3} 卢宇明³ 杨正华^{2,3}

(1. 包头冶金建筑研究院, 包头 014030; 2. 白云鄂博稀土资源研究与综合利用全国重点实验室, 包头 014030;
3. 包头稀土研究院, 包头 014030)

摘要 利用ProCAST软件对AZ91D+0.1%La合金进行车用轮毂低压铸造过程模拟计算, 设置铸造压力为0.12~0.16 MPa, 模具温度为30~400 °C, 浇注温度为680~740 °C。采用正交试验模拟研究铸造压力、模具温度、浇注温度对含稀土镁合金低压铸造过程的影响。结果表明, 随着浇注温度升高, 充型时间缩短及轮毂的铸造缺陷减少; 低压铸造压力升高可显著提高充型速率, 压力为0.16 MPa时, 轮毂的缩孔缩松出现概率更大且分布范围更广; 模具温度提高对充型速率的影响很小。模具温度升高到300 °C时轮毂在轮辐位置缩孔缩松出现的概率降低, 实际生产过程中可以适当提高模具温度以减少轮辐位置处的铸造缺陷。

关键词 镁合金; 压铸; 轮毂; 数值模拟

中图分类号 TG146.45; TG249.2; TG146.22

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240042

Numerical Simulation of Low Pressure Casting Process for Rare Earth Magnesium Alloy Automobile Wheel Hub

LI Yuan¹, HE Wei^{2,3}, HU Wenxin^{2,3}, LU Yuming³, YANG Zhenghua^{2,3}

(1. Baotou Metallurgical Building Research Institute, Baotou 014030; 2. National Key Laboratory of Baiyunobo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization, Baotou 014030; 3. Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou 014030)

Abstract: The ProCAST software was utilized to simulate the low-pressure casting process of AZ91D+0.1%La alloy for automobile wheels. The casting pressure was set as 0.12~0.16 MPa with the mold temperature of 30~400 °C, and the pouring temperature of 680~740 °C. The effects of pressure, mold temperature and pouring temperature on low pressure casting process of rare earth magnesium alloy were simulated by orthogonal test. The results indicate that with the increase of pouring temperature, the filling time and casting defects are decreased. The filling rate is improved with low-pressure casting pressure, and the probability of shrinkage cavity and porosity of the casting is greater with wider distribution range at the casting pressure of 0.16 MPa. The mold temperature has little influence on mold filling rate. With the mold temperature rising to 300 °C, the probability of shrinkage cavity and porosity in the casting wheel hub at the spoke position are reduced. Therefore, the mold temperature can be appropriately raised to reduce casting defects at the spoke position during the actual production process.

Key Words: Magnesium Alloy, Die Casting, Wheel Hub, Numerical Simulation

新能源汽车作为重要战略性新兴产业, 是我国最具发展潜力的重要领域之一^[1-3]。研究表明, 汽车轮毂轻量化能大幅度提高车辆的续航里程、操控性能、加速刹车性能及乘坐舒适度^[4-5]。镁合金是比铝合金在汽车轻量化更有效果的材料, 在比强度和比刚度上均高于铝合金和钢铁。

现有镁合金轮毂主要采用锻造法和铸造法生

产^[6-7]。锻造轮毂的晶粒流向与受力的方向一致, 其强度、韧性与疲劳强度均显著优于铸造轮毂。但锻造轮毂的缺点是整套工艺周期和流程长、投资成本巨大, 且镁合金棒坯良品率较低、棒坯产能受限, 同时生产成本比铸造轮毂高^[8-9]。故目前国内外镁合金锻造轮毂仍处于工艺摸索或小批量试产状态, 其产品主要投放使用在赛车及高端车辆上, 市场普及率^[10]。镁合金轮

收稿日期: 2024-02-01; 修订日期: 2024-03-21

基金项目: 内蒙古自然科学基金资助项目(2022MS05045)

第一作者简介: 李媛, 女, 1991年出生, 工程师, E-mail: 1531867253@qq.com

通信作者: 何伟, 男, 1993年出生, 工程师, E-mail: hewei@brir.com

引用格式: 李媛, 何伟, 胡文鑫, 等. 稀土镁合金汽车轮毂低压铸造工艺数值模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(5): 711-717.

LI Y, HE W, HU W X, et al. Numerical simulation of low pressure casting process for rare earth magnesium alloy automobile wheel hub[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(5): 711-717.

毂的铸造成形工艺有重力浇注、高压压铸、挤压铸造、低压铸造和电磁泵低压铸造等,近年来国内一些研究单位对镁合金轮毂铸造成形工艺开展了大量研究^[11]。

廖慧敏等^[12]开展了挤压铸造研究,利用数值模拟软件对侧向浇注和中心浇注的AM60B镁合金摩托车轮毂铸件进行了模拟,通过对金属充型过程的可视化观察及分析表明,中心浇注系统更为合理。进一步对优化后的浇注系统进行凝固过程模拟和缺陷分析,发现铸件缩孔缩松和卷气倾向明显减少,改善了铸件品质,优化了铸造过程。李春玲^[13]针对轮毂工业设计特点,应用ProCAST软件对轮毂的重力铸造、压铸成形方式进行了CAE仿真对比分析。发现铸件的內圈结构限制了其采用重力铸造的可行性,因其在內圈和边缘将产生较多的缩孔、缩松。经过浇注系统改进后,采用压铸能有效解决重力铸造过程中出现的缩松、缩孔问题。依据压铸CAE结果,设计了相应的压铸模具,模具结构简单实用。王果等^[14]进行了低压铸造铝合金轮毂模具热变形的数值模拟,针对模具高温变形影响低压铸造铝合金轮毂尺寸精度的问题,通过数值模拟和试验相结合的方式,揭示低压铸造过程中模具的变形规律。蔡锁岐等^[15]通过重力铸造试制了镁合金(AM60B)汽车轮毂,分析了合金成分及工艺的影响。试制过程中出现的主要缺陷是轮缘、轮辐裂纹,轮毂缩松等。试制中敏感的影响因素有:模具温度及其均匀性、抽芯时间、浇注温度、內浇口进液均衡性、涂料厚度等。在采取措施控制以上各工艺因素的基础上,确定了克服多种缺陷的优化工艺条件。

目前有关低压铸造镁合金轮毂的研究报道很少,主要受限于现有材料牌号、成形原理和装备匹配等多方面原因^[16]。本研究选取力学性能良好且常用镁合金牌号的AZ91D+0.1%La进行汽车轮毂低压铸造成形、凝固过程数值模拟,研究不同浇注温度、浇注压力、模具温度情况下的轮毂成形性能,旨在为相关零件生产提供参考。

1 模型建立及参数设置

1.1 几何模型建立

对车用轮毂进行三维几何建模,见图1。几何模型下部区域为轮毂的浇注系统:由竖直向上的直浇道组成,其决定了浇注过程的充型状态及温度场分布,是影响轮毂质量的关键性因素。几何模型的上部区域为轮毂区,在充型过程中尤其要保证该部分充型平

稳,减少卷气以及湍流的产生。网格划分采用软件自带的mesh模块进行,对三维图形进行面缺陷、体重重复检查,面、体都无缺陷。重复后对模具部分、轮毂部分单元格尺寸分别设置为10 mm、2 mm,面网格形式设置为Quad,设置完成后生成面网格。面网格检查无缺陷后生成体网格,最终面网格、体网格数分别为488 298、19 422 749个。该网格划分方案下网格生成后的效果图见图1。

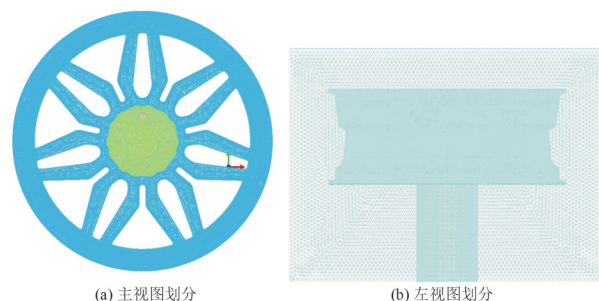


图1 轮毂几何模型及网格划分

Fig.1 Geometric model of wheel hub and grid mesh

1.2 铸造工艺

在常规低压铸造轮毂过程中,铸造工艺参数如浇注温度、模具温度以及铸造压力等与轮毂的品质紧密相关。针对这些因素设计了3因素4水平的正交试验设计,见表1。对不同参数下轮毂低压铸造过程进行数值模拟,研究轮毂铸造压力及温度场的分布规律,并对其质量进行分析。

表1 3因素4水平正交试验设计

Tab.1 3-factor and 4-level orthogonal experimental design

编号	浇注温度/℃	模具温度/℃	铸造压力/MPa
DY-1	680	30	0.12
DY-2	700	30	0.12
DY-3	720	30	0.12
DY-4	740	30	0.12
DY-5	720	30	0.14
DY-6	720	30	0.16
DY-7	720	300	0.12
DY-8	720	400	0.12

1.3 参数设置

在仿真分析过程中,对轮毂的充型和凝固过程进行数值模拟。设置虚拟模具,并将轮毂与模具之间的传热系数设为 $1\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,轮毂材质质量分数为0.1%La的AZ91D镁合金,模具材质为H13钢,轮毂设置为0,表示“entity”,浇注时金属液可以注入;模具设置为100%,表示实体,无退让性。计算采取LPDC Filling方式进行低压铸造计算。

2 模拟结果讨论

2.1 浇注温度对低压铸造过程的影响

选取 DY-1、2、3、4 试验方案进行浇注温度对低压

铸造过程影响的研究。图 2 为不同浇注温度时低压铸造轮毂的充型模拟结果,可以看出,不同浇注温度下模具的充型保持平稳流动,没有发生紊流飞溅现象,整个充型顺序保持一致。随着浇注温度升高,充型所需要的时间略有变化,表明浇注温度对充型效率影响不大。

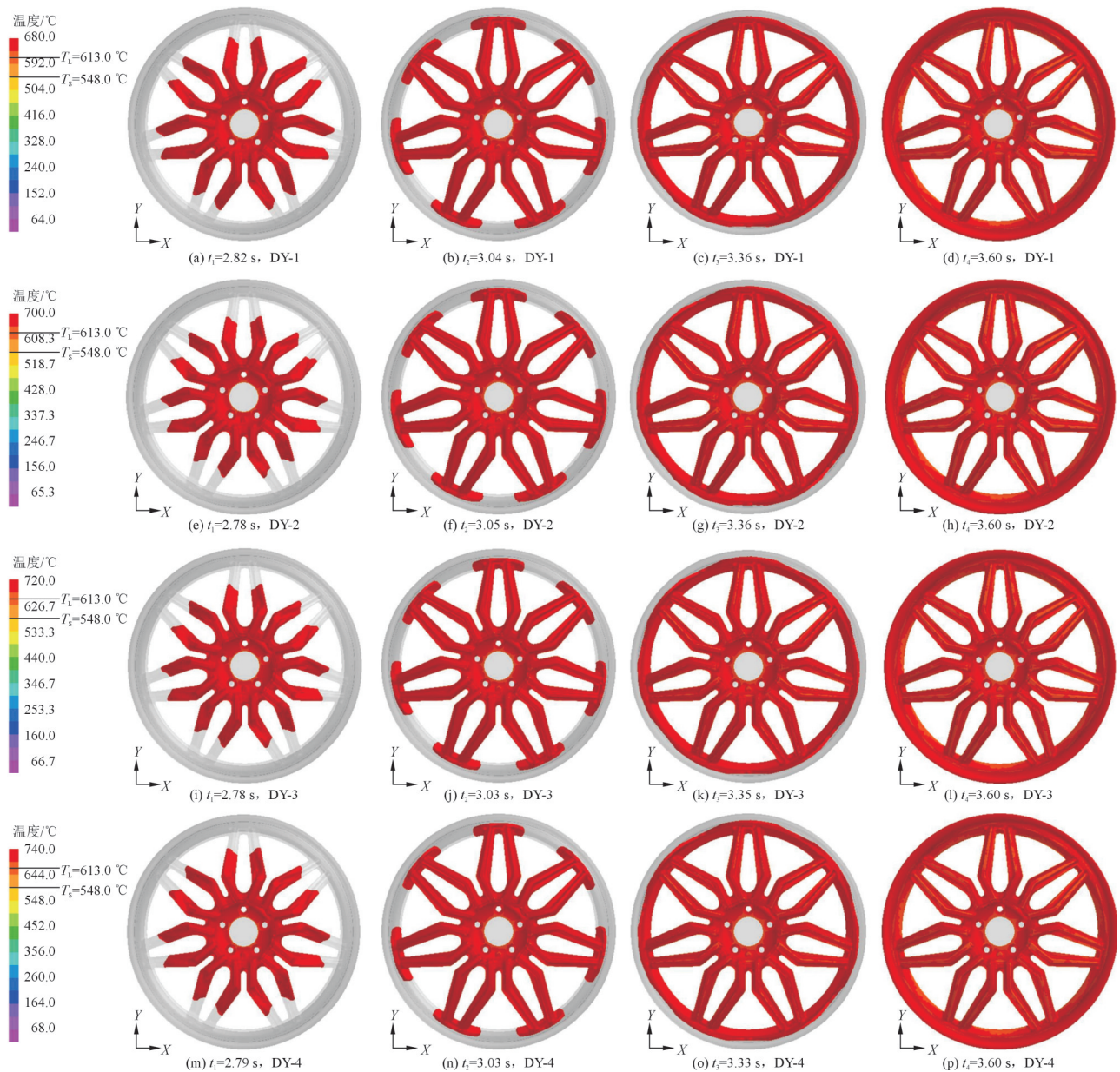


图 2 不同浇注温度下低压铸造轮毂的充型过程

Fig. 2 Filling process of low pressure casting wheel hub at different pouring temperatures

选取 4 种试验方案下轮毂的总缩孔缩松概率 [Total shrinkage porosity (TSP)]、凝固时间 (Time to solidus) 对轮毂的铸造缺陷进行对比分析,见表 2。可以看出,随着铸造温度增加,轮毂凝固所需时间不断延长。同时比较 4 种浇注温度工艺制度下的缩孔缩松分布情况,DY-3 缩孔缩松结果最优,这是因为 DY-3 充型结束时的温度较高,凝固过程中可以更好地进行补缩,

表 2 不同浇注温度下轮毂凝固及缩孔缩松参数
Tab.2 Solidification and shrinkage parameters of hub under different pouring temperatures

编号	总缩孔缩松概率(TSP)/%	凝固时间/s
DY-1	89.63	87.70
DY-2	89.13	92.44
DY-3	88.59	97.19
DY-4	89.98	101.94

故而缩孔缩松最少。

图 3 为不同浇注温度下低压铸造轮毂的缩孔缩松结果。从图 3a~图 3d 中可得,不同浇注温度的缩孔缩松出现位置分布基本一致,主要集中在轮辋位置。轮辋位置由于轮毂壁厚较薄,在金属型的强烈激冷作用

下,该部分率先凝固,使得凝固后期即使在压力作用下也无法从浇口处得到足够的金属液,因此容易出现缩孔缩松缺陷。比较图 3i~图 3l 可知,随着 TSP 的不断增加,轮毂的缩孔缩松位置不断减少,表明轮毂凝固过程中缺陷最有可能出现的位置集中在轮辋与轮辐连接处。

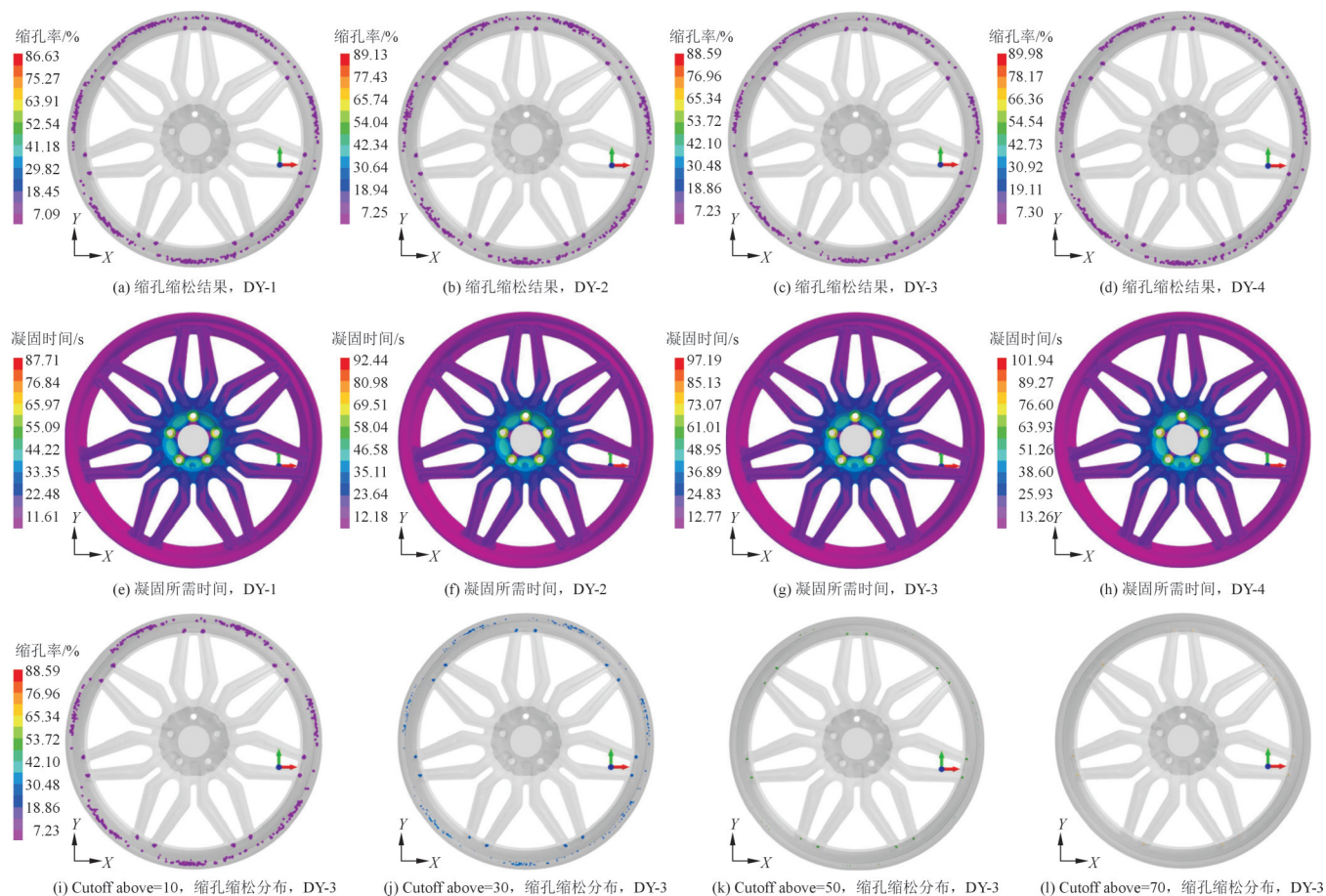


图 3 不同浇注温度下低压铸造轮毂的缩孔缩松情况

Fig.3 Shrinkage cavity and porosity of low pressure casting wheel under different pouring temperatures

2.2 浇注压力对低压铸造过程的影响

图 4 为不同浇注压力时轮毂的充型模拟结果。可以看出,不同浇注压力下模具的充型保持平稳流动,没有发生紊流飞溅现象,整个充型顺序保持一致。不同充型压力下充满整个模具的时间分别为 3.60、2.25、1.69 s,低压铸造压力的升高可显著提高充型速率。在充型结束时刻,轮毂一些部位开始降温且有低于固相线温度趋势,产生缺陷概率增大。

表 3 为不同浇注压力下轮毂凝固及缩孔缩松分布。可以看出,不同浇注压力对轮毂凝固所需时间影响不大。浇注压力对轮毂缺陷的影响主要集中在缩孔缩松的出现概率,随着浇注压力的增加轮毂的缩孔缩松出现概率不断增加。故而在保证低压铸造顺利进行情况下,不适宜提高低压铸造的铸造

表 3 不同浇注压力下轮毂凝固时间及缩孔率

Tab.3 Time to solidus and TSP of wheel hub under different pouring pressures

编号	TSP/%	凝固时间/s
DY-3	88.59	97.19
DY-5	88.97	97.09
DY-6	92.63	97.05

压力。

图 5 为不同浇注压力下低压铸造轮毂的缩孔缩松情况。可见缩孔缩松出现位置同样分布基本一致且主要集中在轮辋位置。提高压力到 0.16 MPa 时轮毂的缩孔缩松出现概率更大且分布范围更广。实际生产过程中应保证顺利充型的情况下选择最小的充型压力,本模型选择最小充型压力为 0.12 MPa。

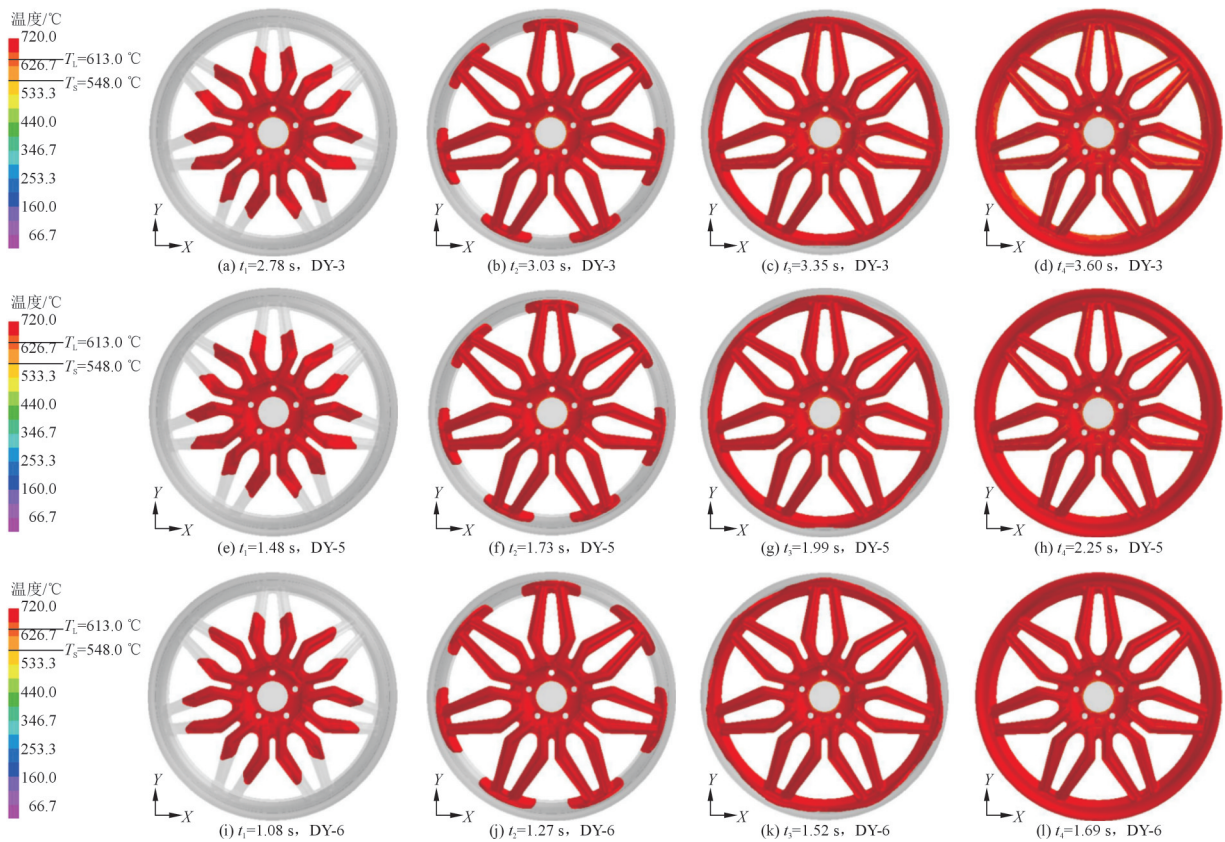


图4 不同浇注压力下低压铸造轮毂的充型过程

Fig.4 Filling process of low pressure casting wheel hub under different pouring pressures

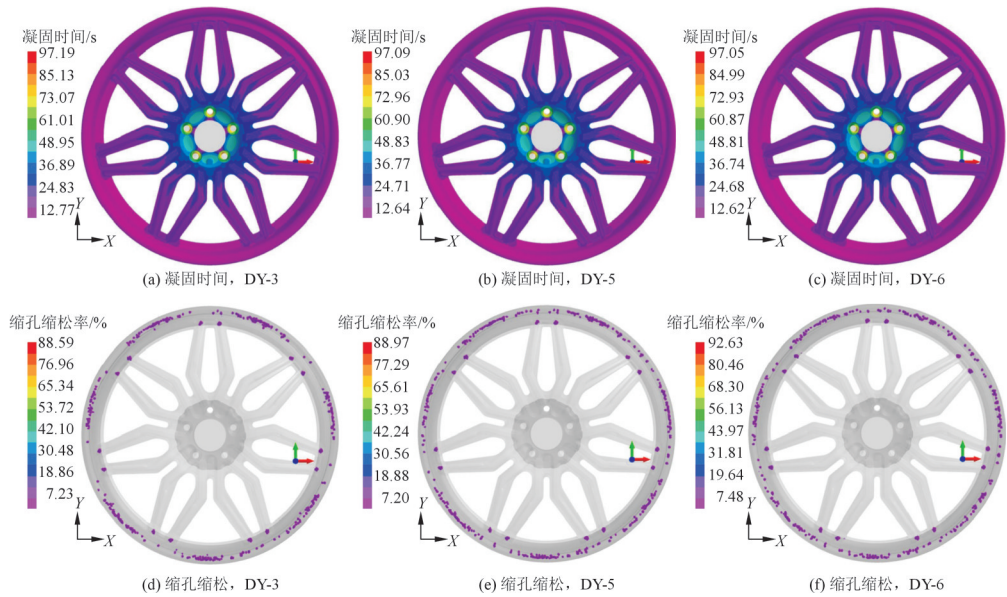


图5 不同浇注压力下低压铸造轮毂的缩孔缩松情况

Fig.5 Shrinkage cavity and porosity of low pressure casting wheel hub under different pouring pressures

2.3 模具温度对低压铸造过程的影响

选取DY-3、DY-7、DY-8等3组试验方案进行模具温度对低压铸造过程影响的研究。图6为不同模具温度时轮毂的充型模拟结果。可以看出,不同模具温度条件下模具的充型保持平稳流动,没有发生紊流飞溅现象,整个充型顺序保持一致。模具温度提高,模具充

满时间变化很小,模具温度对充型速率的影响很小。

不同模具温度对轮毂铸造过程的影响主要集中在对轮毂凝固所需时间,表4为模具温度下轮毂凝固及缩孔缩松参数,模具温度由30℃提高到300℃时,轮毂凝固所需时间增加了300%以上,故而轮毂有足够的时间进行补缩,缩孔缩松出现概率由88.59%变为63.88%,

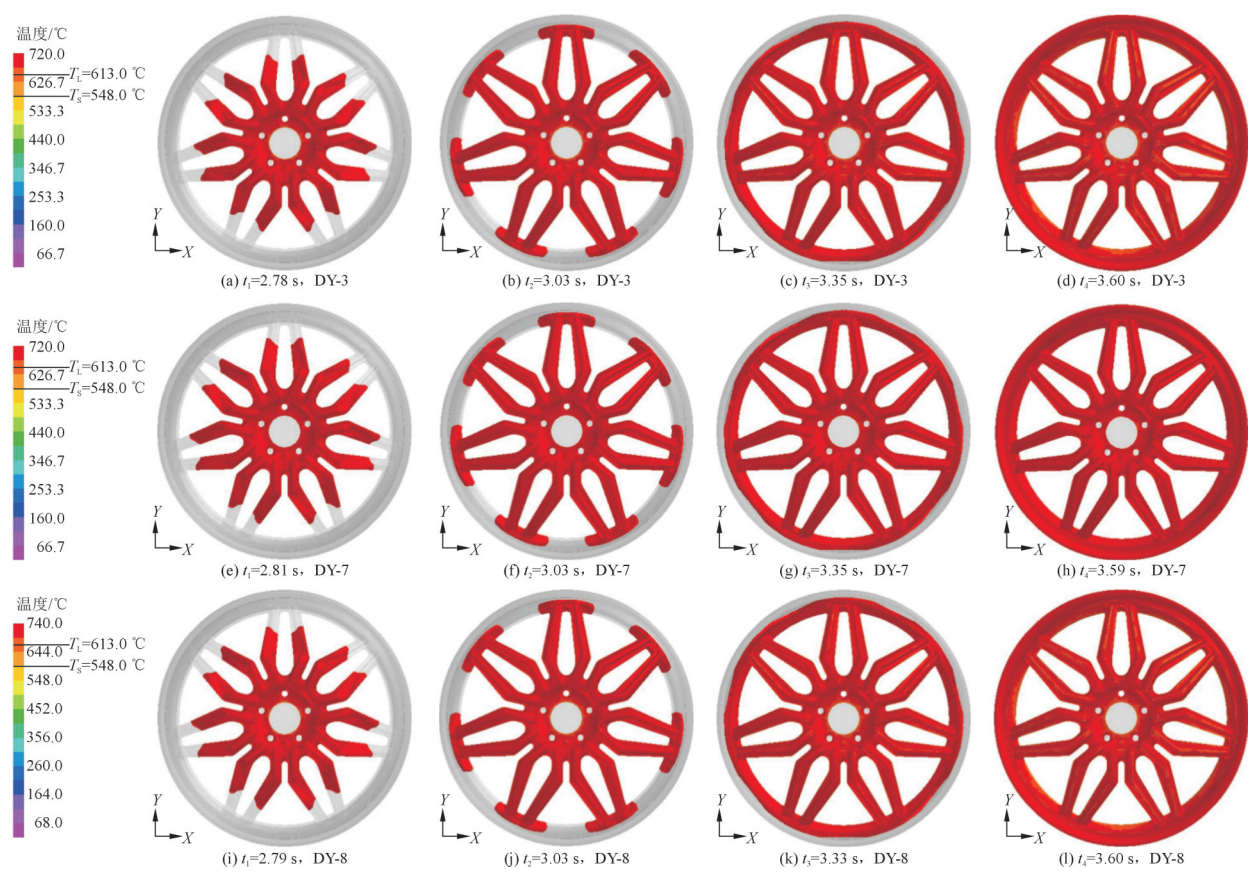


图 6 不同模具温度下低压铸造轮毂的充型过程

Fig.6 Filling process of low pressure casting wheel hub under different mold temperatures

表 4 不同模具温度下轮毂凝固及缩孔缩松参数
Tab.4 Time to solidus and TSP of wheel hub under different mold temperatures

编号	TSP/%	凝固时间/s
DY-3	88.59	97.19
DY-7	63.88	369
DY-8	60.06	1 564

降低了 27.89%。但是继续提高模具温度至 400 °C,虽然凝固所需时间继续增加,但是在薄壁位置率先凝固导致液体补缩量存在上限。故而在保证低压铸造顺利进行情况下,可以在保证成本的情况下适当提高模具温度来降低轮毂的缩孔缩松出现概率。

图 7 为不同模具温度下低压铸造轮毂的缩孔缩松

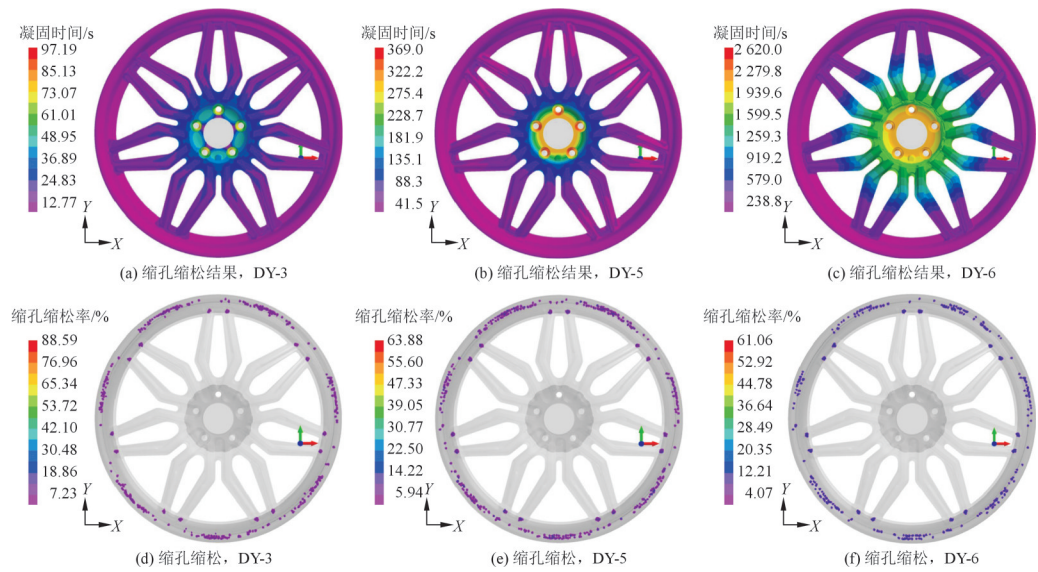


图 7 不同模具温度下低压铸造轮毂的缩孔缩松情况

Fig.7 Shrinkage cavity and porosity of low pressure casting wheel under different mold temperatures

情况。缩孔缩松出现位置同样分布基本一致且主要集中在轮辋位置。但是,模具温度升高到300℃时轮毂在轮辐位置缩孔缩松出现概率降低。这是因为提高模具温度,轮毂在充型结束时轮辐位置温度较高,金属液可以更好地进行补缩。实际生产过程中可以适当提高模具温度以降低轮辐位置处的铸造缺陷。

综上所述,通过正交试验对轮毂低压铸造过程影响的分析,并对各因素的影响权重进行比较,确定最优的工艺参数组合:浇注温度为720℃、低压铸造压力为0.12 MPa,模具温度为300℃。

3 结 论

(1)随着浇注温度升高,充型所需时间缩短,表明浇注温度升高可提高浇注充型效率。同时,浇注温度适当提高可降低轮毂的铸造缺陷。

(2)低压铸造压力的升高可显著提高充型速率,提高压力到0.16 MPa时,轮毂的缩孔缩松出现概率更大且分布范围更广。实际生产过程中要选择适当的铸造压力。

(3)模具温度提高,模具充满时间由3.597 7 s降低到3.59 s,模具温度对充型速率的影响很小。模具温度升高到300℃时轮毂在轮辐位置缩孔缩松出现概率降低。实际生产过程中可以适当提高模具温度以降低轮辐位置处的铸造缺陷。

(4)确定最优的工艺参数组合是浇注温度为720℃、低压铸造压力为0.12 MPa、模具温度为300℃。

参 考 文 献

- [1] 王智文,冯昌川.新能源汽车轻量化技术路径及开发策略[J].汽车工艺与材料,2021(6):1-12.
- [2] 王宁,成军宇,贾明正,等.新能源汽车轮毂轻量化设计[J].汽车工艺与材料,2023(6):118-120.
- [3] 王双林,赵智忠.新能源汽车电池托盘用镁合金的挤压工艺优化[J].热加工工艺,2021(7):103-107.
- [4] 聂伟刚.低压铸造铝合金轮毂的数值模拟与工艺优化[D].河北秦皇岛:燕山大学,2014.
- [5] 孝成美.汽车轮毂的结构分析及轻量化设计[D].山东青岛:山东科技大学,2020.
- [6] 邱克强,王磊,刘彬,等.镁合金汽车轮毂低压铸造数值模拟[J].铸造,2011,60(12):1 214-1 217.
- [7] 程宇楨.AZ80+0.4%Ce镁合金轮毂挤压成形及关键部位力学各向异性机制研究[D].太原:中北大学,2023.
- [8] 曾月梅,汤铁装,周剑,等.镁合金摩托车车轮毂压铸技术的研发与研究[J].特种铸造及有色合金,2011,31(3):229-232.
- [9] 徐圆义.基于服役性能及锻造工艺的6061铝合金轮毂结构优化[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [10] 张国俊,孙志平,邹丽艳.铸造过程数值模拟的应用与展望[J].热

加工工艺,2010,39(21):61-64.

- [11] 杨志伟.AZ80镁合金汽车轮毂锻造成形数值模拟及实验研究[D].河北秦皇岛:燕山大学,2014.
- [12] 廖慧敏,龙思远,李凤娥,等.挤压铸造镁合金轮毂浇注系统的数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2008,28(4):271-273.
- [13] 李春玲.基于PROCAST分析的汽车轮毂成形工艺及模具设计[J].模具技术,2020(4):19-27.
- [14] 王果,黄嘉敏,陈振明,等.低压铸造铝合金轮毂模具热变形的数值模拟[J].精密成形工程,2023,13(10):95-103.
- [15] 蔡锁岐,崔尔信.镁合金汽车车轮重力铸造研究[J].铸造技术,2001,22(5):8-10.
- [16] 张金山.汽车发动机缸体低压铸造工艺设计及数值模拟[D].太原:太原理工大学,2015.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16开,邮发代号38-109。邮发订价每期20元,全年240元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦10楼

邮编:430015

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

