

一体式车体低压铸造工艺方案设计

王鑫 苏小平

(南京工业大学机械与动力工程学院, 南京 211816)

摘要 以一体式车体为研究对象, 对其进行低压铸造工艺方案设计, 在 MagmaSoft 软件中对初始浇注系统进行数值模拟并优化工艺方案。结果表明, 优化后的工艺方案消除了铸造缺陷, 显著提高了铸件的力学性能, 满足设计要求。

关键词 一体式车体; 数值模拟; 低压铸造; 工艺优化

中图分类号 TG249.2

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240379

Design of Low Pressure Casting Process for Integrated Vehicle Body

WANG Xin, SU Xiaoping

(Department of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing 211816)

Abstract: Taking integrated vehicle body as object, a low-pressure casting process scheme was designed, and the initial gating system was simulated and optimized by MagmaSoft software. The results indicate that the optimized process scheme can eliminate casting defects and significantly improve the mechanical properties of castings, meeting design requirement.

Key Words: Integrated Vehicle Body, Numerical Simulation, Low Pressure Casting, Process Optimization

目前全球汽车行业正由传统汽车行业向新能源汽车、电动汽车发展^[1], 汽车的轻量化越来越受到重视。铝合金作为轻量化材料在汽车领域的应用越来越广泛。在铝合金产品生产中, 低压铸造技术因其成本低, 且操作简单, 获得广泛应用。

针对铝合金一体式车体, 通过在 CATIA 建模软件中初步设计浇注系统, 并在 MagmaSoft 软件中进行模拟仿真, 根据仿真结果优化浇注系统, 以减少缩松、缩孔等缺陷, 提高产品质量并进行验证, 旨在为相关产品生产提供参考。

1 铸件结构与材料

铝合金一体式车体结构见图 1, 其轮廓尺寸为 632 mm×86 mm×250 mm, 材质为 A356 合金。铸件

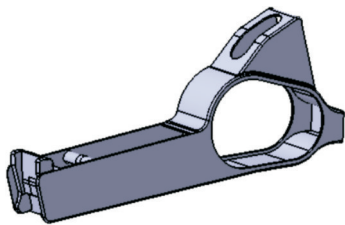


图 1 一体式车体三维模型

Fig.1 3D model of integrated vehicle body

毛坯体积约为 $9.6 \times 10^5 \text{ mm}^3$, 质量约为 2.63 kg, 壁厚较薄, 主体部分壁厚为 4~8 mm。铸件右半部分明显高于左侧, 使得铸件右侧比左侧难以补缩。为保证铸件成形质量, 需对铸造工艺方案进行合理设计, 初步设计为 1 模 1 件的金属型低压铸造工艺。

2 低压铸造成形工艺设计

2.1 浇注系统设计

2.1.1 各浇道截面面积计算

内浇道截面面积可以通过浇注系统经验公式求得, 再通过各个浇道的截面面积比例关系计算出横浇道和直浇道的横截面积, 内浇道的横截面积计算经验公式为:

$$\sum A_{\text{内}} = \frac{m}{\rho v t} \quad (1)$$

式中, $\sum A_{\text{内}}$ 为内浇道的横截面积之和; m 为零件的总质量, 取 2.63 kg; ρ 为金属液的密度, 2.7 g/cm^3 ; v 为金属液流经内浇道的充填速度; t 为充填时间。金属液在型腔中上升速度取 2.5 cm/s , 可以根据型腔总高度 250 mm 与型腔中金属液升高速度比值确定 $t=10 \text{ s}$ 。由于铸件平均壁厚为 4~8 mm, 根据经验公式取合金液流经内浇口的充填速度 v 为 10 cm/s , 将以上数据代

收稿日期: 2024-09-19; 修订日期: 2024-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175465)

第一作者简介: 王鑫, 男, 2001 年出生, 硕士研究生, E-mail: 761696690@qq.com

引用格式: 王鑫, 苏小平. 一体式车体低压铸造工艺方案设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(10): 1592-1595.

WANG X, SU X P. Design of low pressure casting process for integrated vehicle body[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(10): 1592-1595.

入式(1)计算得到内浇道的横截面积为 10 cm^2 [2]。

根据常见的浇注系统中浇道截面面积比例关系可得 $\Sigma A_{\text{内}}:\Sigma A_{\text{横}}:\Sigma A_{\text{直}}=1.0:(1.5\sim 1.7):(2.0\sim 2.3)$ 。通过经验和计算,取 $\Sigma A_{\text{内}}:\Sigma A_{\text{横}}:\Sigma A_{\text{直}}=1.0:1.5:2.0$ 。因此,铸件浇注系统横浇道和直浇道的截面积分别为 15 cm^2 和 20 cm^2 。

2.1.2 浇注系统设计

为实现从下到上平稳充型,初步采用底注式充型。相对于其他浇注系统,底注式浇注系统可以更好地控制,结合计算得出的浇注系统各浇道的截面积。初步设计出浇注系统见图2。

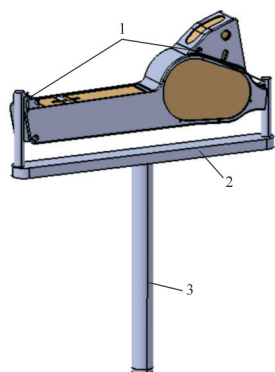


图2 初步设计浇注系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of preliminary design of gating system

1. 内浇道 2. 横浇道 3. 直浇道

2.2 工艺参数设计

2.2.1 压力曲线设计

在低压铸造过程中,压力曲线控制着金属液升液、充型、增压、保压直至卸压的全过程 [3-4]。升液压力可以根据升液压力计算,经验公式为:

$$P_1 = \mu_1 \rho g h_1 \quad (2)$$

式中, μ_1 为金属液升液过程中的流动阻力系数,取 1; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; h_1 为金属液面到内浇口上表面高度,取 600 mm 。将上述数据代入式(2)计算出 P_1 约为 15 kPa ,升液时间取 6 s 。

充型阶段为金属液从型腔下底面经过浇道到充满

整个型腔的过程,金属液在压力作用下充型,可在一定程度上提升金属液的流动性,进而有利于形成表面粗糙度低且轮廓清晰的铸件,尤其对于复杂薄壁铸件的成形更为有利 [5],此阶段的压力 P_2 可计算为:

$$P_2 = P_1 + \mu_2 \rho g h_2 \quad (3)$$

式中, μ_2 为充型过程中的流动阻力系数,取 1.3; h_2 为型腔高度,取 250 mm 。将上述数据代入式(3)得到充型压力 P_2 约为 25 kPa ,充型时间为 10 s 。

当合金液充型完成,铸件进入冷却凝固阶段,需要继续增大压力使铸件补缩和冷却结晶,此阶段称为增压阶段,增压压力 P_3 可计算为:

$$P_3 = K P_2 \quad (4)$$

式中, K 为增压系数,取 2.0,计算得增压压力 P_3 约为 50 kPa ,增压时间取 4 s 。

保压阶段指充型结束后压力不再升高,开始保持压力到浇口凝固为止的时间,保压压力 $P_4 = P_3$,保压时间取 100 s 。

综上,最终确定压力曲线见图3。

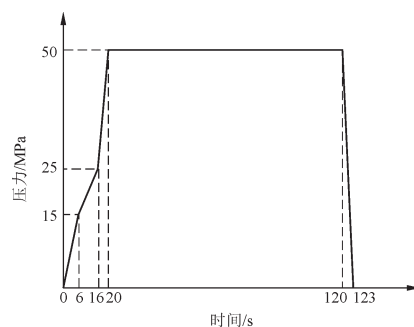


图3 低压铸造过程的压力曲线

Fig.3 Pressure curves of low-pressure casting process

2.2.2 温度参数设计

温度参数的合理性会影响到低压铸造铸件的成形质量 [5],主要包括浇注温度和模具预热温度。温度设置不能过高和过低,而温度场是衡量铸造稳定性的重要因素 [6],根据经验公式中 AlSi7Mg0.3 合金的温度设定,本试验确定浇注温度为 710°C ,模具预热温度为 350°C 。确定初始低压铸造的工艺参数见表1。

表1 一体式车体低压铸造初始工艺参数

Tab.1 Initial process parameters for low-pressure casting of integrated vehicle body

升液压力/kPa	升液时间/s	最大充型压力/kPa	充型时间/s	保压压力/kPa	保压时间/s	浇注温度/ $^\circ\text{C}$	模具预热温度/ $^\circ\text{C}$
15	6	25	10	50	100	710	350

3 初始工艺数值模拟分析

3.1 模拟边界条件确定

经过多次模拟对比,选择铸件与砂芯的传热系数为 $500 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,铸件与模具之间的传热系数为 $2000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,砂芯与模具的传热系数为 $300 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,

模具间的传热系数为 $3500 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。环境温度取 20°C ,开模温度取 540°C ,其他参数见表1。

3.2 数值模拟结果分析

3.2.1 充型过程数值模拟分析

充型过程温度场见图4。可以看出, $t=5.979 \text{ s}$ 时,金属液升液刚刚完成,顺利进入横浇道,此时金属液

整体平稳无任何异常现象;当 $t=9.824$ s时铸件存在左低右高的非对称结构以及中间壁厚不均匀的问题,最上方液面开始出现紊流,这会导致铸件难以顺序凝固产生缩松、缩孔等缺陷;当 $t=10.950$ s时,液面回归平稳状态;当 $t=14.920$ s时整个充型过程结束。在自然

冷却条件下,铸件在凝固过程中没能实现合理的顺序凝固,容易导致缩松缩孔缺陷的产生。为进一步提高铸件的成形质量,应根据铸件凝固过程的数值模拟分析结果进行合理的冷却系统的设计,以改善其凝固过程中的温度场^[7]。

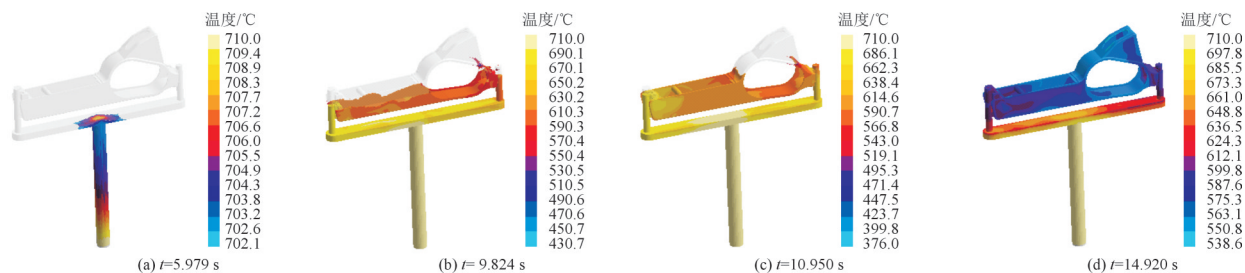


图4 铸件充型过程温度场

Fig. 4 Temperature field during filling process

3.2.2 凝固过程数值模拟分析

凝固过程产生的缩松、缩孔缺陷见图5。由于铸件两内浇道距离中心内浇道过长,使得铸件难以补缩,最终形成孤立液相区,从而产生缩松、缩孔缺陷^[8]。



图5 铸件缩松、缩孔所在位置示意图

Fig.5 Schematic diagram of location of shrinkage porosities and cavities

铸件凝固过程温度场见图6。可以看出,由于铸件本身壁厚不均,结构复杂,导致铸件凝固过程无法实现自上而下顺序凝固,部分地方温度不均匀,出现热节。



图6 铸件凝固过程温度场

Fig.6 Temperature field during solidification process

4 工艺改进措施

4.1 改进浇道

缩松、缩孔缺陷大部分分布在铸件中间以及右半部分,针对此问题,在横浇道中段添加两个中心内浇道,中间两内浇道的横截面半径为8.8 mm,优化后的浇注系统见图7。

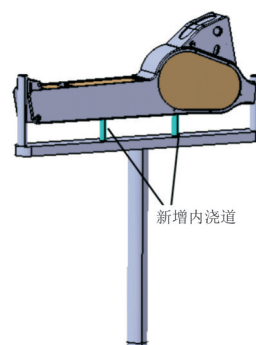


图7 优化后浇注系统示意图

Fig.7 Schematic diagram of optimized gating system

4.2 冷却系统设计

铸件部分壁厚不均易导致铸件较厚大部位处热量无法消散,容易造成在凝固过程出现热节。针对此问题,在铸件出现热节的地方添加设计冷却系统。合理的冷却参数设计有助于顺序凝固,消除缺陷,加快其冷却速度^[9],冷却系统采用水冷的方式,优化后的冷却系统见图8,其他冷却工艺参数见表2。

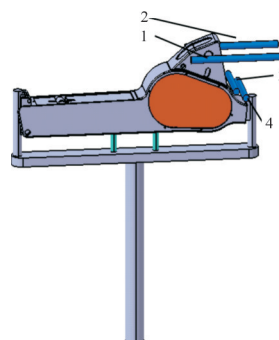


图8 优化后冷却系统示意图

Fig.8 Schematic diagram of optimized cooling system

4.3 改进方案数值模拟分析

对改进后的方案进行数值模拟,一般用二次枝晶臂间距值来反映铸件的力学性能,方案改进前后二次

表 2 冷却工艺参数

Tab.2 Cooling process parameters

管路编号	管路直径/ mm	管路长度/ mm	开启时间/s	冷却水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
1	18	240	12~120	3.0
2	18	240	12~120	3.0
3	18	160	12~150	2.5
4	18	160	12~150	2.5

枝晶臂间距对比见图 9。可以看出,优化前铸件的二次枝晶臂间距最大值为 $42.56\text{ }\mu\text{m}$,优化后铸件的二次枝晶臂间距最大值为 $36.88\text{ }\mu\text{m}$ 。二次枝晶臂间距值减小了 13.35%,可见由于冷却系统的添加,凝固温度梯度得到优化且凝固时间缩短,铸件力学性能提高^[10]。

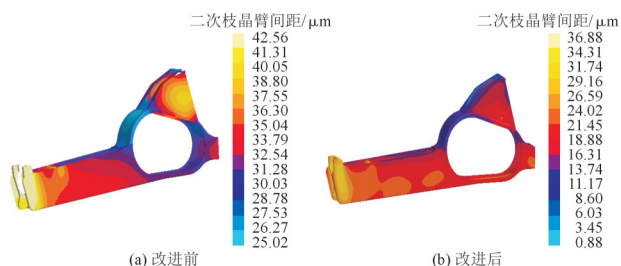


图 9 改进前后二次枝晶臂间距对比示意图

Fig.9 Comparison diagram of secondary dendrite arm spacing before and after optimizing gating system

改进方案前后铸件缩松缩孔缺陷分布见图 10。可以看出,铸造工艺改进前,缩松、缩孔分布较多,铸件成形质量不佳,力学性能差。通过改进浇注系统和添加冷却系统,缩松缩孔判据值减小到低于 1,铸件缩松、缩孔缺陷基本消除,凝固温度梯度得到优化且凝固时间减少,得到的一体式车体铸件质量、力学性能更好,缺陷更小,证明了此工艺方案的合理性。

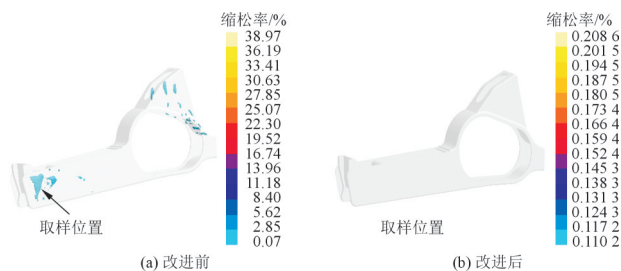


图 10 改进前后缩松、缩孔缺陷分布对比图

Fig.10 Distribution comparison of shrinkage porosities and cavities before and after optimization

工艺方案改进后,在试制车体数值模拟缺陷最严重处取样,见图 10b 箭头处,该位置的金相图见图 11。可以得出车体内已无明显缩松、缩孔现象,铸件力学性能明显改善。

综上,通过添加冷却系统,体积较大、分布较集中的缺陷已基本消除,且凝固时间大幅缩减,提高铸件生产效率的同时减小了铸件的二次枝晶臂间距值,起到了细化晶粒、提高铸件整体力学性能的作用。方案改进前后的铸件质量评价指标对比见表 3。

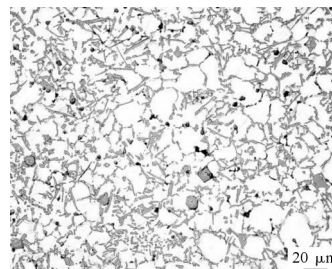


图 11 铸件数值模拟缺陷最严重处金相组织图

Fig.11 OM image of defect in the numerical simulation of castings at the most severe region

表 3 改进前后铸件质量指标对比示意图

Tab.3 Comparison of casting quality indicators before and after optimization

方案	缩松缩孔缺陷率/%	最大二次枝晶臂间距/ μm	凝固时间/s
初始方案	38.97	42.56	165.94
改进方案	0.208 6	36.88	106.20

5 结 论

(1)对一体式车体低压铸造工艺进行数值模拟分析,通过对充型、凝固过程的模拟结果分析,预测铸件缩松、缩孔缺陷的分布以及大小,并分析产生原因。

(2)在初始工艺方案的基础上,通过改进浇道、添加冷却等措施进行优化设计,最终消除了铸件中的缩松、缩孔缺陷。

(3)对优化后的工艺方案和添加的冷却系统进行数值模拟分析,结果显示二次枝晶间距值减小了 13.35%。由于冷却系统的添加,凝固温度梯度得到优化且凝固时间减少,铸件力学性能得到提升。

参 考 文 献

- [1] 张东生. A356 低压铸造铝合金车轮工艺优化及组织性能研究[D]. 河北秦皇岛:燕山大学,2023.
- [2] 顾方秋,苏小平. 铝合金变速器操纵盒体低压铸造工艺设计及其优化[J]. 铸造,2022,71(12): 1 542-1 547.
- [3] 刘吉东,邹晓华,邹晓东等. 铝合金缸体铸件低压铸造压力曲线的设定[J]. 金属加工(热加工),2022(6): 111-113.
- [4] 马世旋,姜爱龙,许景峰,等. 低压铸造技术特点及常见缺陷浅析[J]. 铸造设备与工艺,2023(5):13.
- [5] 陈志,李昌海. Magmasoft 模拟条件与低压铸造铝车轮生产条件匹配性研究[J]. 铝加工,2015(6): 26-30.
- [6] 谭云骧,马聚怀,许庆彦. 铝合金低压铸造过程数值模拟[J]. 铸造,2024, 73(3): 270-281.
- [7] 赵飞,苏小平,周大双,等. 铝合金变速箱后壳压铸工艺设计与数值模拟优化[J]. 热加工工艺,2024, 53(3): 150-153.
- [8] 王宇航,苏小平. 铝合金薄壁壳体低压铸造工艺方案设计[J]. 铸造,2022, 71(8): 990-993.
- [9] 李玉东,尚守研,武汉昌,等. 浅析铝合金轮毂低压铸造模具的冷却方法探究[J]. 中国金属通报,2018(10): 73-74.
- [10] 杨闯,苏小平,周大双,等. 铝合金箱体挤压铸造工艺的多目标优化[J]. 热加工工艺,2023, 52(19): 67-70.

(编辑:张正贺)