

低压铸造铝合金蜗轮减速机壳体工艺设计及优化

吴琪琪 苏小平
(南京工业大学机械与动力工程学院)

摘 要 为提高低压铸造蜗轮减速机壳体成形品质并提高生产效率,利用数值模拟方法对其凝固过程中的温度场、缩松缩孔情况进行分析。预测了缩松缩孔缺陷的位置分布及大小,并分析其形成原因。在此基础上,通过改进浇道、调整工艺参数、添加冷却等措施进行优化设计。结果表明,优化后的铸件内无缩松、缩孔缺陷,提高了铸件品质,凝固时间缩短了 38.8%。通过金相分析,验证了此优化工艺的可行性。

关键词 减速机壳体;低压铸造;工艺优化;金相分析
中图分类号 TG249.2;TG146.21 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2022.08.025



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Design and Optimization of Low-pressure Die Casting Process for Aluminum Alloy Worm Reduction Gears

Wu Qiqi, Su Xiaoping

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Technology University)

Abstract: In order to improve the quality of low-pressure die casting worm reduction gear housing and production efficiency, numerical simulation methods were used to analyze the temperature field and shrinkage porosity during the solidification process. The distribution and size of the shrinkage porosity were predicted, and the reasons for its formation were analyzed. On this basis, through improving the runner, adjusting the technological parameter, and adding cooling channel, the scheme was designed and optimized. The results show that there exists absence of shrinkage porosity in the optimized castings, which improves the quality of the castings and the setting time is reduced by 38.8%. The feasibility of the squeeze casting process was verified by metallographic observation.

Key Words: Reduction Gear Housing, Low-pressure Die Casting, Process Optimization, Metallographic Observation

某工程车辆蜗轮减速机壳体是蜗轮蜗杆动力传输过程中重要的受力部件,传统的壳体多由重力铸造球墨铸铁制备,较重且容易出现铸造缺陷。铝合金壳体具有质量轻、导热性能好等特点,近年来得到广泛应用。低

收稿日期:2022-01-20;**修改稿收到日期:**2022-03-10
基金项目:江苏省高校自然科学研究课题资助项目(19KJB460005)
第一作者简介:吴琪琪,男,1993 年出生,硕士研究生,南京(211816),E-mail:wuqiqinjtech@163.com
通信作者:苏小平,男,1965 年出生,教授,南京(211816),E-mail:suxiaoping@njtech.edu.cn
引用格式:吴琪琪,苏小平. 低压铸造铝合金蜗轮减速机壳体工艺设计及优化[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(8):1 046-1 049.
WU Q Q, SU X P. Design and optimization of low-pressure die casting process for aluminum alloy worm reduction gears[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8):1 046-1 049.

[28] CUI X P, FAN G H, GENG L, et al. Fabrication of fully dense TiAl-based composite sheets with a novel microlaminated micro-structure[J]. Scripta Materialia, 2011, 11(9): 276-279.

[29] BOONRUANG C, THEPPAWONG A. Impact property of TiAl₃-Ti laminated composite fabricated from metallic sandwich [J]. Composite Structures, 2019, 229: 111-379.

[30] SCHUSTER J C, PALM M. Reassessment of the binary Aluminum-Titanium phase diagram[J]. Journal of Phase Equilibria & Diffusion, 2006, 27(3): 255-277.

[31] XU L, CUI Y Y, HAO Y L, et al. Growth of intermetallic layer in multi-laminated Ti/Al diffusion couples[J]. Materials Science and Engineering, 2006, A436(4): 638-647.

[32] LAZURENKO D V, MALI V I, BATAEV I A, et al. Metal-In-termetallic Laminate Ti-Al₃Ti Composites Produced by Spark Plasma Sintering of Titanium and Aluminum Foils Enclosed in Ti-tanium Shells[J]. Metallurgical and Materials Transactions A vol-ume, 2015, A46(9): 4 326-4 334.

[33] LIU M, JIANG F, JIAO F, et al. Continuous carbon fiber rein-forced Ti/Al₃Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites fabricated using ultrasonic consolidation assisted hot pressing sin-tering[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A765: 138-142.

[34] LU Z, JIANG F, CHANG Y, et al. Multi-phase intermetallic mixture structure effect on the ductility of Al 3Ti alloy[J]. Mate-rials Science & Engineering, 2018, A721: 274-285.

(编辑:刘卫)

压铸能够解决传统重力铸造中金属液平稳充型与凝固补缩之间的矛盾,使蜗轮减速机壳体组织致密、力学性能良好^[1]。因此,本课题以蜗轮减速机壳体为研究对象,利用 Magma 软件对其低压铸造工艺方案进行数值模拟,优化铸造工艺以消除铸件缺陷,旨在提高成形品质和生产效率。

1 初始工艺分析

1.1 数值模拟模型建立

图 1 为蜗轮减速机的壳体及其浇注系统三维模型。壳体体积为 0.004 m³,质量为 10.579 kg,三维尺寸为 340 mm×301 mm×238 mm,结构较复杂,平均壁厚大且不均匀。考虑到铸件结构及低压铸造成形工艺的特点,为便于形成良好的补缩通道,采用封闭式浇注系统。

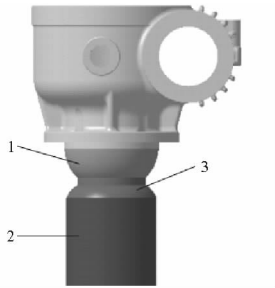


图 1 浇注系统三维模型
Fig.1 3D model of the gating system
1. 浇口套 2. 浇口杯 3. 升液管

1.2 材料选择及工艺参数设置

铸件材质为 A356 铝合金,其热物性参数见表 1,模具采用 H13 钢,其密度随温度变化,表 1 中为 700 ℃时的密度。由于壳体壁厚不均匀,为防止壳体壁薄部分过早凝固而影响补缩,甚至出现冷隔或浇不足缺陷,浇注温度和铸型温度应适当增高。根据帕斯卡原理及经验公式,设置升液压力为 0~15 kPa,升液时间为 3 s,最大充型压力为 30 kPa,充型时间为 10 s,保压压力为 60 kPa,保压时间为 330 s。经过多次模拟结果对比,选择初始浇注温度为 700 ℃,模具温度为 300 ℃。设定金属

液与铸型之间的传热系数为 2 000 W/(m²·K),铸型与铸型间的传热系数为 3 500 W/(m²·K),铸型与大气的传热系数为 20 W/(m²·K)。

表 1 A356 铝合金的热物性参数^[2]

Tab.1 Thermophysical parameters of A356 aluminum alloy			
密度/ (kg·m ⁻³)	液相线温度/ ℃	固相线温度/ ℃	潜热/ (kJ·kg ⁻¹)
2 430	614	542	430

1.3 初始工艺数值模拟结果分析

铸件凝固过程中的温度场变化见图 2。铸件在 12.1 s 时充型完成,此时铸件最低温度高于固相线温度,未出现冷隔和浇不足情况。从图 2a 中圈出部位可以看出,铸件从顶部边缘开始凝固,但由于铸件顶部平均壁厚偏大且厚度不均,在壁厚较大区域内部出现温度过高的孤立液相区,外部区域先于此处凝固,且得不到补缩,最终形成缩孔缺陷。图 2b 中圈出部位,传热面积较大,温度下降较快,容易形成分散的缩松缺陷。铸件的浇口放置在壳体底部安装孔的位置,该部分平均壁厚偏小,且对称分布有 4 个加强筋,由此造成整个铸件的补缩通道偏窄且传热面积较大。图 2c 中圈出部位处于壳体过渡区域,壁厚较大,内部区域容易形成热节,导致凝固时间较长。而该区域下方的补缩通道存在结构上的缺陷,不利于铝液补缩,也易形成集中的缩孔缺陷。

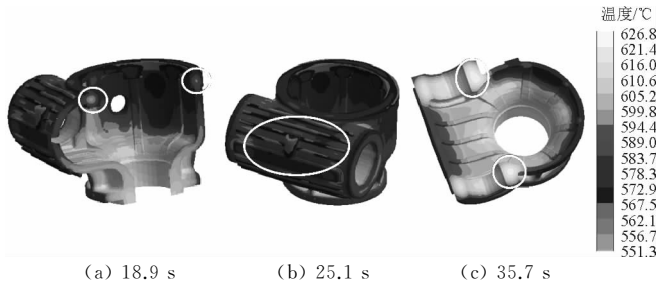


图 2 凝固过程中温度场变化

Fig.2 Temperature field variation during solidification

铸件的缩松缩孔缺陷的整体分布见图 3,和缩松缺陷分析基本一致。通过剖面图可以看出,缺陷内部的孔隙率不断变化,呈边缘向中心增大的趋势。这是由于孤立液相区补缩不足,导致中心孔隙率较高。缩松和缩孔

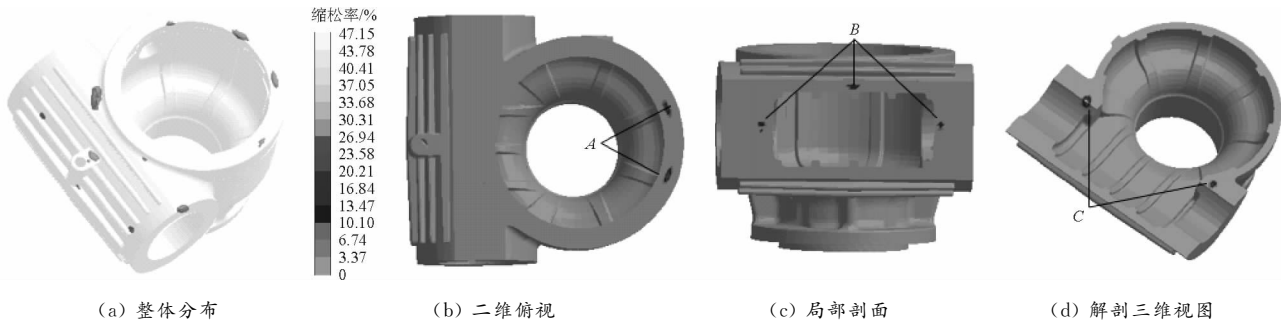


图 3 初始工艺缩松、缩孔形貌

Fig.3 The shrinkage porosity of initial process

形成的主要原因是金属凝固过程中,其体积收缩造成的体积亏损得不到补偿。为使铸件得到足够的补缩,就必须形成自上而下的顺序凝固,即远离浇道处先凝固,浇道处最后凝固,否则就会产生缩松、缩孔缺陷^[3]。

根据金属结晶的过程和机理,金属结晶速度越快,二次枝晶间距越小,性能越好。因此在实际生产中可以通过适当缩短凝固时间来提高和改善合金性能^[4]。初始工艺参数下数值模拟的凝固时间为 362.78 s。

2 工艺优化措施

2.1 改进浇道

根据初始浇注系统存在的问题以及铸件缺陷出现的位置,需对现有浇注系统进行相应改进。综合分析,问题主要集中在以下 3 点:①铸件最先凝固部分即铸件顶部,见缺陷 A 处,壁厚过大且厚度不均,应设置在靠近浇口的位置^[5];②缺陷 B 处,局部尺寸较小且传热面积较大,该区域远离浇口,凝固过快且不利于铝液补缩;③浇口位置平均壁厚较小,且设有加强筋,造成铸件的补缩通道偏窄,不利于缺陷 C 处的补缩。针对初始浇注系统存在的问题,拟更改浇口位置,改进后的浇注系统见图 4。

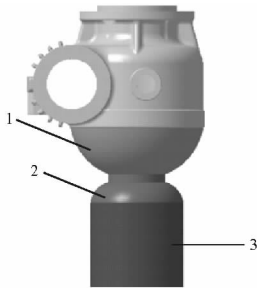


图 4 改进后的浇注系统
Fig.4 The modified gating system
1. 浇口套 2. 浇口杯 3. 升液管

在初始浇注工艺参数的基础上,采用正交试验设计进行工艺参数的多目标优化。根据经验选取对充型效果影响最大的 4 个因素:浇注温度、模具预热温度、升液时间和充型时间,并在其合适范围内设置 4 个水平,得到 1 组相对最优的工艺参数,见表 2。

表 2 低压铸造浇注工艺参数

Tab.2 Pouring parameters for low pressure casting							
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/℃	模具温度/℃
15	3	25	12	80	300	720	280

优化后的模拟结果见图 5。改进后的浇注系统使铸件的壁厚较大部位位于浇口位置,最后凝固,并且使补缩通道变宽,铝液的充型过程也变得更加平稳。铸件传热面积较大以及容易产生热节的部位靠近浇口位置,

利于铝液补缩。从优化后的模拟结果可以看出,改进后的浇道明显使缩松、缩孔缺陷减少。

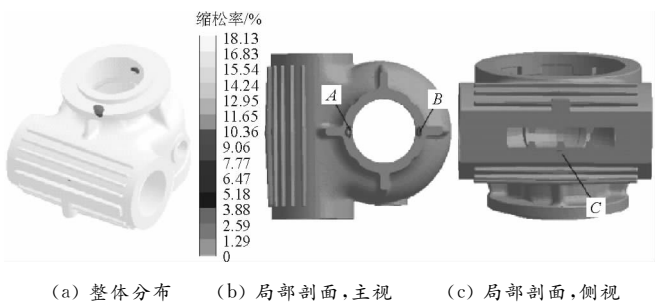


图 5 优化后的缩孔、缩松模拟结果
Fig.5 The simulation of shrinkage porosities(holes) results after optimization design

从图 5b 和图 5c 可以看出,虽然铸件中仍然存在 A、B、C 三处缩松、缩孔缺陷,但是整体缺陷区域明显减少,且相对集中,较初始浇注工艺方案下的缺陷更容易设置冷却形貌。

2.2 冷却优化

与初始工艺方案结果相比,上述优化方案虽然明显减少了缩松缩孔缺陷,但仍未完全消除,仍存在孤立液相区,需对该区域进行局部冷却,采用水冷。在布置冷却管路时需注意,不能仅对有缺陷的区域施加冷却,因为施加的冷却管路会对周围铸件的凝固过程产生影响,需根据实际模拟结果做相应调整^[6]。图 6 为模具结构及冷却系统的设置示意图。如在设置管路 3 和管路 6 消除原有缺陷时,在管路 2、4、5 三处又会出现新的缺陷,因此又增加了 2、4、5 三条冷却管路。由于管路 6 处的缺陷难以消除,需要在其周围增设 7、8、9 三条冷却管路。因浇口处最后凝固且凝固速度较慢,为提高铸件整体凝固速率,设置冷却管路 10。

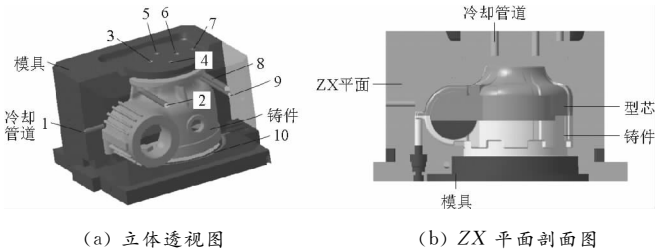


图 6 模具结构及冷却系统的设置示意图
Fig.6 Diagram of mold structure and cooling system setup

根据缺陷体积大小,设置不同的管路直径。同时根据凝固过程中铸件各部分温度场变化情况,设置各冷却管路开启和关闭时间,根据缺陷消除的效果调整冷却水的温度以及流速。模具冷却方式初始设置为室温(25℃)自然冷却,初始流速设为 0.5 m³/h,冷却管路与模具之间的传热系数为 5 000 W/(m²·K)。根据多次模拟结果获得最终的冷却工艺方案,见表 3。

表 3 冷却工艺参数表
Tab.3 Cooling parameter

编号	管路直径/mm	冷却介质	流速/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	冷却水温/ $^{\circ}\text{C}$	开启时刻/s	终止时刻/s
1	12	水	0.7	25	20	100
2~3	16	水	1	25	11	100
4~5	16	水	1.2	25	7	90
6~8	16	水	2.7	25	4	80
9	12	水	2.7	25	4	80
10	16	水	1.5	25	170	220

2.3 优化方案可行性验证

为了更好地判断铸件凝固过程是否实现顺序凝固，

数值模拟时增加 3 个测温点。在铸件原有缺陷的区域进行取点测温，测量铸件凝固过程中各个测温点的温度变化。测温点分布及其温度曲线见图 7。理想状态下，在固、液相线温度之间 1~3 号测温点的温度应为 $T_1 < T_2 < T_3$ 。从图 7b 可以看出，在固、液相线温度之间曲线相交情况明显，缺陷区域没有实现顺序凝固。优化后的测温点温度曲线在固、液相线温度之间呈现 $T_1 < T_2 < T_3$ ，说明铸件在此区域已实现顺序凝固。经冷却优化后的凝固时间为 222.18 s，凝固时间较未加冷却前的初始工艺方案缩短了 38.8%。依据最优工艺方案进

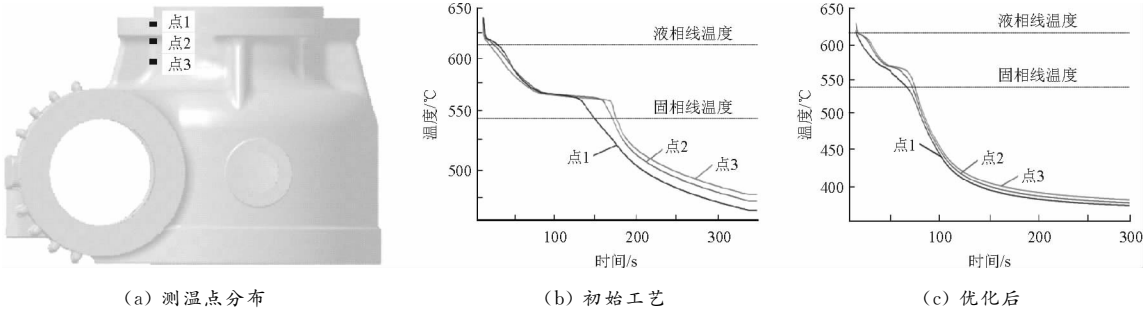


图 7 测温点分布及其温度曲线

Fig.7 Temperature measurement point distribution and temperature curves

行生产试制。铸件经冷却优化后，模拟结果中已无宏观缩松、缩孔缺陷，根据优化后的工艺参数进行实际生产，铸件品质良好，达到预期效果。在试制壳体具有代表性

的位置提取金相试样，见图 8a 中 A、B 两点。对金相试样处理后，观察其微观组织，见图 8b 和图 8c。发现壳体内部组织均匀、晶粒细小，无明显的缩松、缩孔缺陷，

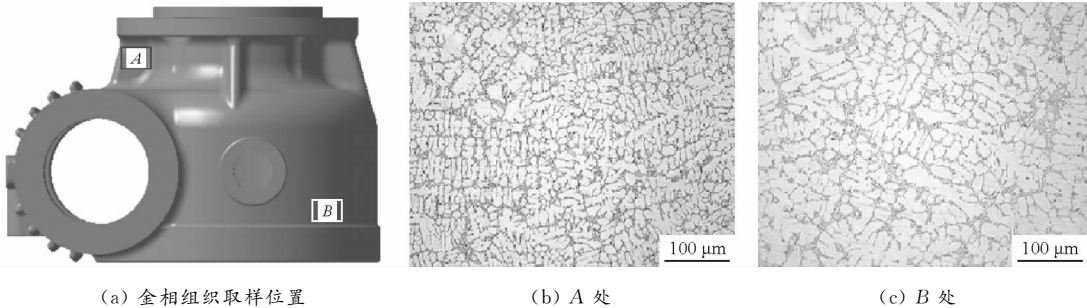


图 8 金相组织取样及微观组织观察

Fig.8 The sampled point and observation of microstructure

证明了优化工艺方案的可行性。

3 结 论

- (1)对铝合金蜗轮减速机壳体低压铸造工艺进行数值模拟,通过温度场等模拟结果进行分析,预测了蜗轮减速机壳体中缩松、缩孔缺陷的分布及大小,并分析其形成原因。
- (2)在初始工艺方案的基础上,通过改进浇道、调整浇注工艺参数、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)在消除缺陷的同时,凝固时间缩短了 38.8%,使铸件获得更好的力学性能,提高了实际生产效率。

参 考 文 献

[1] 单嘉立,尹家新,徐志锋,等.低压铸造 ZL114A 铝合金舱段壳体铸件工艺研究[J].特种铸造及有色合金, 2018, 38(8): 856-859.

[2] 朱晓红,张卫东,卢艳宏.AISi7Mg 连杆半固态挤压铸造成形数值模拟[J].热加工工艺, 2012, 41(21): 82-85.

[3] 章舟,彭兴玖.铸件缺陷及修复技术[M].北京:化学工业出版社, 2013.

[4] 邱孟书,王小平.低压铸造使用技术[M].北京:机械工业出版社, 2011.

[5] 刘艺,王华.基于 ProCAST 的上倾框铸造工艺设计优化[J].热加工工艺, 2019, 48(15): 72-77.

[6] 程颖,王淇奥,钱晨晖,等.铝合金电机壳低压铸造数值模拟及工艺优化[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(7): 802-808.

(编辑:张正贺)