

铝合金动圈骨架低压铸造工艺数值模拟研究

谢 涛 陈乐平 袁源平 潘俊霖
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 动圈骨架是电动振动台的核心构件,低压铸造因金属液平稳充型、顺序凝固,适合生产存在薄壁的铸件。基于 ProCAST 软件对 ZL302 铝合金动圈骨架进行低压铸造数值模拟,设置浇注温度为 690~730 ℃,砂型预热温度为 30~100 ℃,保压压力为 23~33 kPa。采用正交试验研究浇注温度、砂型预热温度、保压压力对铝合金动圈骨架低压铸造成形的影响。结果表明,随着浇注温度升高,金属液充型效率提高,铸件的缩孔缩松率降低;砂型预热温度升高对金属液充型效率影响较小,但延长铸件凝固时间,有利于铸件补缩;低压铸造凝固过程中提高保压压力,有利于铸件补缩,铸件内部缩孔缩松体积由 0.13 cm³ 降至 0.11 cm³。实际生产过程中,在保证砂型强度的前提下,适当增加保压压力以减少缩孔、缩松缺陷。

关键词 铝合金;低压铸造;数值模拟

中图分类号 TG146.21;TP311;TG249.2 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.010.010 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Numerical Simulation of Low-pressure Casting Process of Aluminium Alloy
Moving Coil Skeleton

Xie Tao, Chen Leping, Yuan Yuanping, Pan Junlin

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The moving ring skeleton is the core component of the electric shaker, and low-pressure casting is suitable for the production of thin-walled castings due to the smooth filling and sequential solidification of liquid metal. Based on the ProCAST software, low pressure casting of ZL302 aluminium alloy moving ring skeleton was simulated with the pouring temperature of 690~730 ℃, sand preheating temperature of 30~100 ℃, holding pressure of 23~33 kPa. Orthogonal experiments were conducted to investigate the effects of pouring temperature, sand preheating temperature, holding pressure on the low-pressure casting aluminium alloy moving ring skeleton. The results reveal that with the increase of pouring temperature, the efficiency of liquid metal filling is improved and the shrinkage rate of the casting is reduced. The increase of sand preheating temperature has less effect on the efficiency of liquid metal filling, however it can prolong the solidification time of casting, which is conducive to the feeding. The increase of holding pressure in the process of low-pressure casting is conducive to the feeding, and the volume of shrinkage inside the castings is decreased from 0.13 cm³ to 0.11 cm³. In the production process, under the premise of ensuring the strength of sand mould, the holding pressure is appropriately increased to reduce the shrinkage defects.

Key Words: Aluminium Alloy, Low Pressure Casting, Numerical Simulation

电动振动台可满足各种振动工况下的模拟需求,并已应用于汽车、航空航天等领域典型振动构件的模拟试验。动圈骨架是电动振动台的核心构件,主要用于传递振动和承载试件,故要求其具有质量轻、高刚度、高共振频率等特点^[1]。动圈骨架采用传统重力铸造工艺成形,缺陷多、性能差,铸件成品率低。低压铸造是在反重力

条件下充型和在一定压力条件下凝固的铸造工艺,与重力铸造相比,其金属液充型平稳,不易卷气和夹渣,并且在压力下凝固有利于金属液的补缩,减少缩孔、缩松等缺陷,能够显著提高铸件的力学性能^[2-4]。张娜等^[5]通过改变浇注工艺和使用低压铸造等措施解决了 AC7A 铝镁合金动圈骨架的夹渣和缩松问题;苏大为等^[6]利用

收稿日期:2023-05-23;修改稿收到日期:2023-07-12
基金项目:江西省科技重点研发计划资助项目(20212BBE53018);南昌航空大学研究生创新专项基金资助项目(YC2023-021)
第一作者简介:谢涛,男,1999 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:2283117240@qq.com
通信作者:陈乐平,男,1964 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:jnnclp@163.com
引用格式:谢涛,陈乐平,袁源平,等. 铝合金动圈骨架低压铸造工艺数值模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(10):1 385-1 390.
XIE T, CHEN L P, YUAN Y P, et al. Numerical simulation of low-pressure casting process of aluminium alloy moving coil skeleton[J].
Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10):1 385-1 390.

ProCAST 软件对某铝合金轮毂新产品的多种工艺方案进行模拟分析,将改进后的工艺方案投入试生产,产品抽检结果与模拟结果基本一致;杨闻等^[7]采用数值模拟技术,研究了低压铸造中合金液的浇注温度、模具预热温度以及充型时间对铸件孔隙率的影响,得出最佳的低压铸造工艺参数,经过试制生产,良品率可达 86%;朱慧明等^[8]用数值模拟对卡钳低压铸造凝固过程中的温度场、缩松缩孔进行了分析,并通过优化浇道、采取局部保温、添加冷却等措施进行了工艺优化,明显消除了铸件内的缩松、缩孔缺陷^[9-11]。

本研究采用 ProCAST 软件对铝合金动圈骨架低压铸造过程进行数值模拟,分析浇注温度、砂型预热温度、保压压力的影响,为动圈骨架的生产提供参考。

1 模型建立

动圈骨架材质为 ZL302 合金,其化学成分见表 1,零件结构见图 1,外形轮廓尺寸为 320 mm×360 mm×320 mm,最大壁厚为 23 mm,最小壁厚仅为 8 mm。根据低压铸造工艺对零件结构进行分析,零件表面均设置为不铸出孔,上、下表面设置 4 mm 加工余量。采用三维建模软件 UG 对动圈骨架铸件进行几何建模,见图 1b。

表 1 ZL302 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZL302 aluminium alloy %			
ω _B			
Mg	Si	Mn	Al
4.5~5.5	0.8~1.3	0.1~0.4	余量

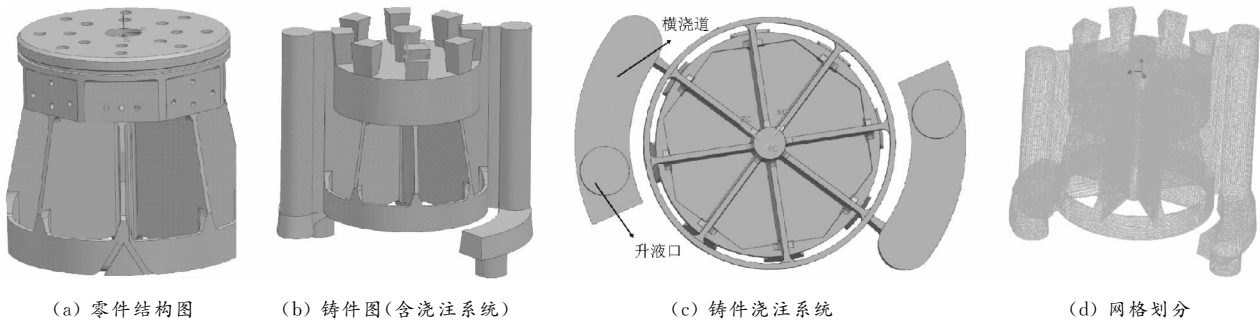


图 1 动圈骨架结构图

Fig.1 Structure of the moving coil skeleton

铸件采用缝隙式浇注系统,见图 1c:铸件下部分的双升液口和横浇道决定了浇注过程中金属液的充型状态;铸件与缝隙式内浇道相连,使得金属液平稳充型,减少卷气和夹渣;铸件最上部为冒口,对铸件起补缩以及集渣作用,降低铸件的缩孔缩松率,提高铸件质量。将建立的几何模型以 X_T 文件格式导入 ProCAST 软件进行网格划分,对铸件模型进行面检查、体检查,并对有缺陷的模型进行修复,对砂型和铸件部分进行网格划分,其单元格尺寸分别为 10 mm、5 mm,最终面网格和体网格数分别为 195 496、3 926 891,见图 1d。

2 低压铸造工艺

低压铸造中,影响铸件质量的主要参数有浇注温度、砂型预热温度、保压压力等。针对铝合金动圈骨架铸件,根据低压铸造原理及生产经验^[12-13],采用低压砂型铸造,浇注工艺参数见表 2,设计的数值模拟方案见表 3。

表 2 浇注工艺参数

Tab.2 Casting process parameters

升液压力/kPa	升液时间/s	充型压力/kPa	充型时间/s	结壳时间/s	保压时间/s	卸压时间/s
3	3	20	37	30	80	2

表 3 数值模拟方案

Tab.3 Numerical simulation schemes

方案	浇注温度/℃	砂型预热温度/℃	保压压力/kPa
1	690	30	23
2	710	30	23
3	730	30	23
4	750	30	23
5	730	30	28
6	730	30	33
7	730	100	23

3 数值模拟计算

采用 ProCAST 软件进行数值模拟。在 CAST 模块中设置重力方向与金属液充型方向相反;虚拟砂箱材质为 Resin Bonded Sand,并设置为实体,力学类型为 Linear-Elastic;铸件材质为 ZL302,力学类型为 Rigid;金属液与砂型的传热系数为 $h = 500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;在砂箱的外表面设为 Air cooling,升液管口设置 Inlet Pressure(此压力参数值应比浇注工艺参数压力值高 0.1 MPa);在 Simulation Parameters 选择 LPDC Filling 进行模拟。

4 模拟结果分析

4.1 浇注温度对低压铸造过程的影响

选择方案 1~4 进行数值模拟分析,见图 2。可以看出,4 组方案下铸件充型过程较为一致,金属液均从升液口向铸型内部平稳充型,无卷气和飞溅现象。根据数值模拟结果分析,随着浇注温度从 690 ℃ 升高到 750 ℃,铸件充型时间从 22 s 降至 20 s,表明随着浇注

温度上升,铸件的充型效率提高,铸件充型时间缩短。主要原因是浇注温度较低时,金属液流动性能变差,难以充填型腔,可能导致冷隔和浇不足缺陷。

图 3 为不同浇注温度下铸件的缩孔缩松分布情况。可以看出,4 组方案下缩孔缩松分布位置较为一致,主要分布在铸件肋板与底座连接处,此处铸件的壁厚较厚,易形成热节产生独立的液相区,使得铸件在保压凝固时压力无法使金属液对热节部位进行补缩,形成缩孔缩松缺陷。方案 1~4 铸件缩孔、缩松体积依次为 0.224、

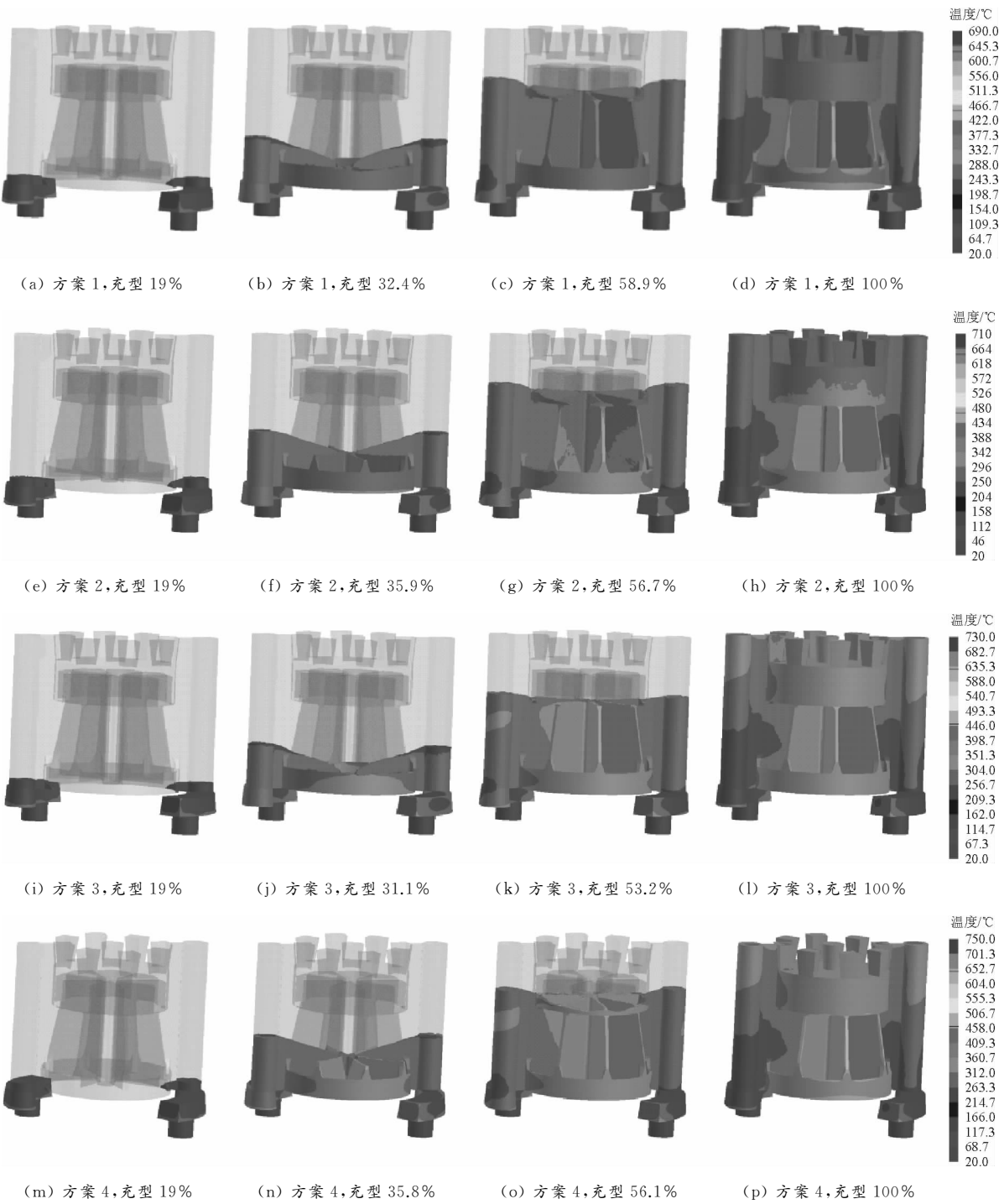


图 2 不同浇注温度下低压铸造数值模拟的充型过程

Fig.2 Numerical simulation of the filling process for low pressure casting at different pouring temperatures

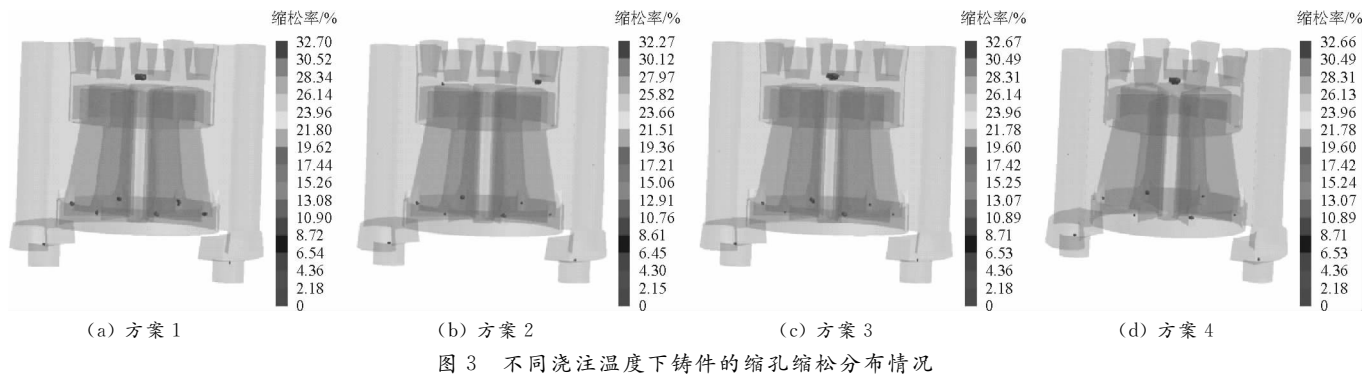


Fig.3 Shrinkage cavity and porosity in casting at different pouring temperatures

0.202、0.128 和 0.140 cm³，其中方案 3(浇注温度 730 ℃)的缩孔缩松体积最小，表明适当提高浇注温度可减小缩孔、缩松体积。

4.2 砂型预热温度对低压铸造过程的影响

为探讨砂型预热温度对动圈骨架低压铸造过程影

响，选择方案 3、方案 7 进行数值模拟分析，结果见图 4。可以看出，在不同砂型预热温度下，金属液充型过程均保持平稳，无飞溅现象。随砂型预热温度提高，金属液充型时间并未明显改变，表明在较高的浇注温度下，砂型预热温度对充型速率影响较小。

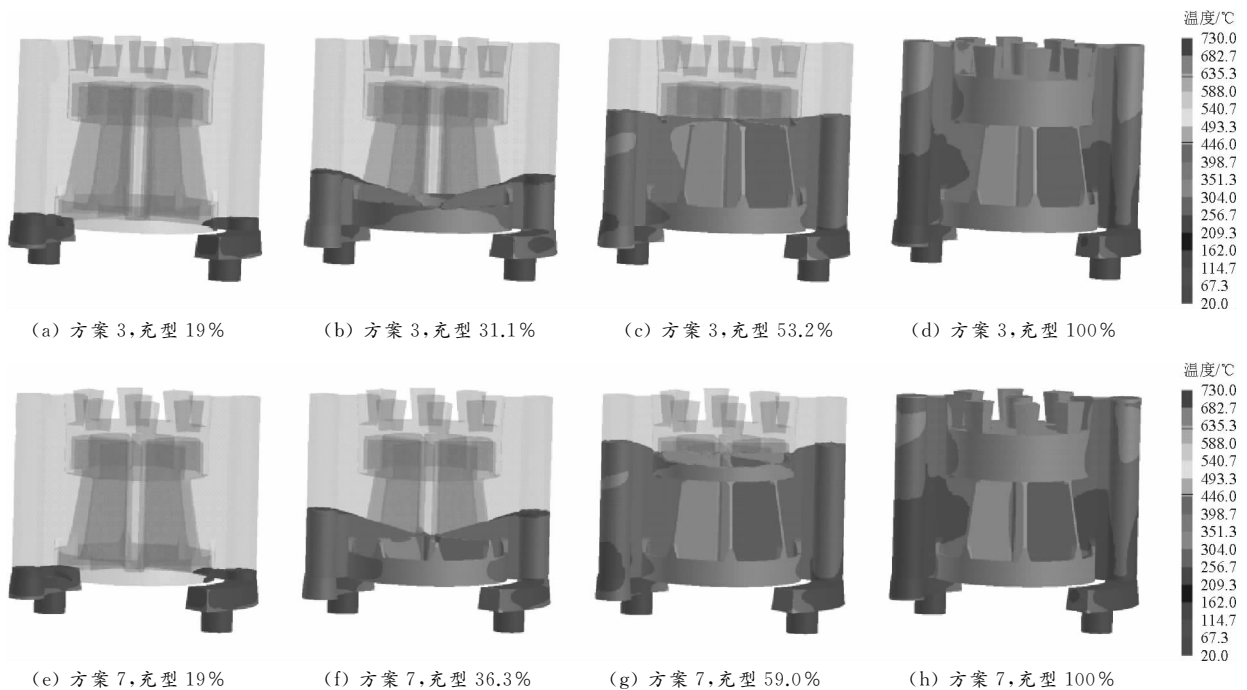


图 4 不同砂型预热温度下低压铸造数值模拟的充型过程

Fig.4 Numerical simulation of the filling process for low pressure casting with different sand preheating temperatures

图 5 为不同砂型预热温度下铸件的缩孔、缩松分布

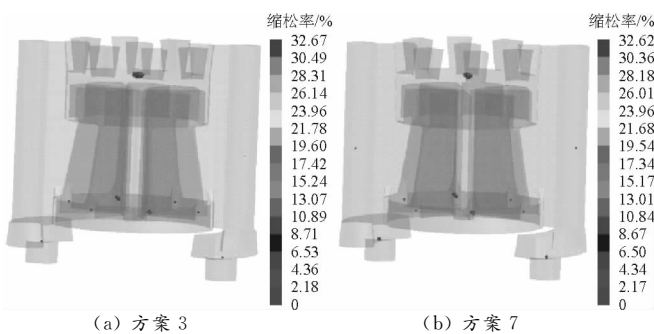


图 5 不同砂型预热温度下铸件的缩孔、缩松分布情况

Fig.5 Shrinkage cavity and porosity in the castings at different sand preheating temperatures

情况。可见在不同的砂型预热温度下，缩孔、缩松分布位置基本保持一致，但砂型预热温度达到 100 ℃时，铸件内部产生的缩孔、缩松体积减小。主要原因是随砂型预热温度升高，充型完成时金属液温度高，在保压阶段金属液能在压力作用下提高对热节部位的补缩效果。因此，在实际生产中可适当提高砂型预热温度以提高金属液的补缩效果。

4.3 保压压力对低压铸造过程的影响

为探讨浇注温度对动圈骨架低压铸造过程影响规律，选择方案 3、方案 5、方案 6 进行数值模拟分析，结果见图 6。可见充型结束时，铸件肋板薄壁处的固相率最

高,靠近内浇道及顶部厚大部位的固相率最低。从铸件凝固过程的固相率分布情况可以看出,铸件整体凝固过程趋于顺序凝固。图 7 为凝固后铸件缩孔缩松分布情况

况。可见随着保压压力增加,铸件缩孔缩松体积由 0.13 cm³降至0.11 cm³,故适当增加保压压力可提高铸件质量。

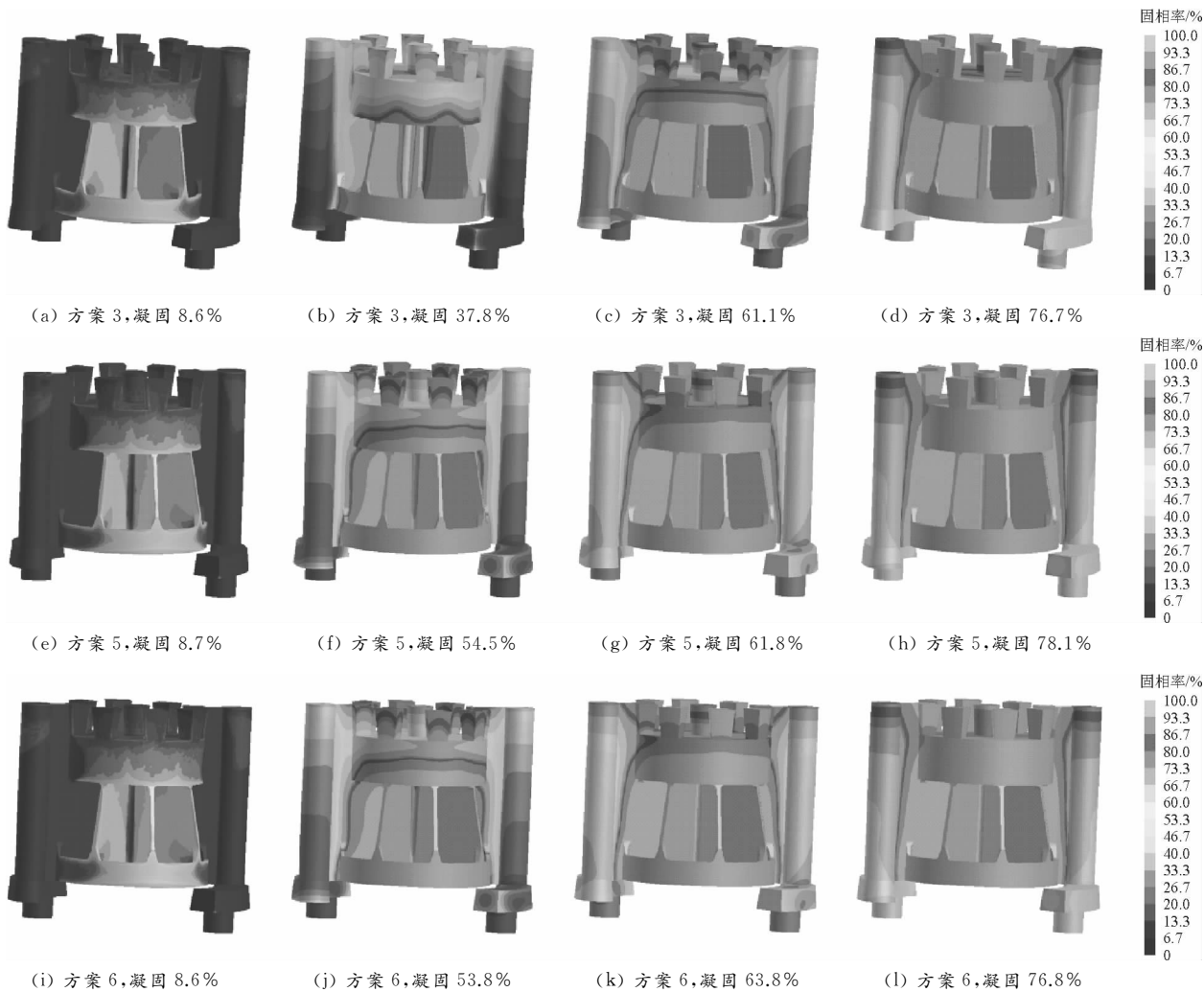


图 6 不同保压压力下低压铸造数值模拟的凝固过程固相率分布情况

Fig.6 Distribution of solid phase rate during solidification from numerical simulations of low pressure casting with different holding pressures

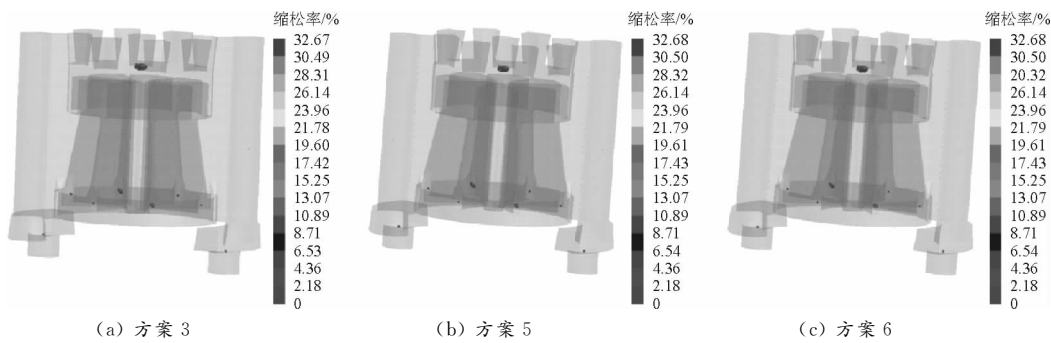


图 7 不同保压压力下凝固后铸件缩孔缩松分布情况

Fig.7 Distribution of shrinkage cavities and porosities in castings after solidification with different holding pressures

5 结 论

(1)随浇注温度升高,金属液流动性增强,充型时间减少,并且铸件的缩孔缩松体积随浇注温度升高呈先减少后增加的趋势,适当提高浇注温度可改善铸造缺陷。

(2)砂型预热温度的提高对铸件充型速率的影响较小,但当砂型预热温度从 30 ℃升高到 100 ℃时,铸件的缩孔、缩松体积随之降低。

(3)在保压凝固阶段,随保压压力增加,金属液的流动性能提高,补缩性能增强,铸件缩孔、缩松体积从0.13 cm³降至0.11cm³,故在实际生产中保证砂型强度的前

氧化时间对 7A04 铝合金微弧氧化膜层组织与性能的影响

杨晓禹¹ 张立君¹ 杨晓杰² 刘 凯¹ 朱礼德² 谭锁奎¹
(1.中国兵器科学研究院宁波分院; 2.山东核电设备制造有限公司)

摘 要 在硅酸盐与铝酸盐混合电解液体系下,在 7A04 铝合金表面制备了微弧氧化陶瓷膜层,通过对膜层的厚度均匀性、电化学特性、物相组成以及表面形貌进行分析,研究了氧化时间对陶瓷膜层厚度、电化学耐蚀性、物相组成与表面形貌的影响。结果表明,膜层微观表面凹凸不平,呈火山喷口状形貌,微弧氧化时间不会改变膜层物相种类,主要由 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 组成;微弧氧化时间是决定微弧氧化膜层性能的关键因素,氧化时间为 25 min 时,膜层厚度均匀性最好,方差为 0.69,腐蚀电位为 -0.482 V ,腐蚀电流密度为 $3.75\times 10^{-7}\text{ A/cm}^2$,极化电阻为 $4.63\times 10^6\ \Omega\cdot\text{cm}^2$;氧化时间为 35 min 时,交流阻抗性能最好。

关键词 氧化时间;铝合金;微弧氧化;均匀性

中图分类号 TG146.21;TG214.6 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.010.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Oxidation Time on Microstructure and Properties of Microarc
Oxide Film of 7A04 Aluminum Alloy

Yang Xiaoyu¹, Zhang Lijun¹, Yang Xiaojie², Liu Kai¹, Zhu Lide², Tan Suokui¹
(1.Ningbo Branch of Chinese Academy of Ordance Science; 2.Shandong Nuclear Power
Equipment Manufacturing Co., Ltd.)

Abstract: The micro-arc oxidation ceramic film was prepared on the surface of 7A04 aluminum alloy in the mixed electrolytic liquid system of silicate and aluminate. The effects of oxidation time on thickness, electrochemical characteristics, phase composition and surface morphology of the film were investigated. The results indicate that the micro-surface of film is uneven and presents volcanic spout. The phase type is hardly changed by micro-arc oxidation time, which is mainly composed of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Microarc oxidation time is a key factor determining the properties of microarc oxidation films. When the oxidation time is 25 min, the optimal variance of thickness uniformity, maximum corrosion potential, minimum corrosion current and the maximum polarization resistance are 0.69, -0.482 V , $3.75\times 10^{-7}\text{ A/cm}^2$, and $4.63\times 10^6\ \Omega\cdot\text{cm}^2$, respectively. When the oxidation time is 35 min, the AC impedance performance is desirable.

Key Words: Oxidation Time, Aluminum Alloy, Microarc Oxidation, Uniformity

收稿日期:2022-10-27;修改稿收到日期:2023-04-23

基金项目:宁波市江北区关键核心技术攻关资助项目(202201A09);宁波市自然科学基金资助项目(202003N4339)

第一作者简介:杨晓禹,男,1989 年出生,副研究员,浙江宁波(315103),E-mail:yangxiaoyuguoying@foxmail.com

引用格式:杨晓禹,张立君,杨晓杰,等.氧化时间对 7A04 铝合金微弧氧化膜层组织与性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(10):1 390-1 394.

YANG X Y, ZHANG L J, YANG X J, et al. Effects of oxidation time on microstructure and properties of microarc oxide film of 7A04 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10):1 390-1 394.

提下,适当增加保压压力可提高铸件质量。

参 考 文 献

[1] 朱江峰,周华明,赵斌.一种电动振动台低失真动圈骨架结构:中国, CN202020425461.4[P].2023-07-19.
[2] LIU S G, CAO F Y, ZHAO X Y, et al. Characteristics of mold filling and entrainment of oxide film in low pressure casting of A356alloy[J]. Mater. Sci. Eng., 2015, A626: 159-164.
[3] 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.
[4] 王晓磊,孙少纯,李燕杰.低压铸造船用铝合金电气箱工艺研究[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(7): 913-917.
[5] 张娜,刘颖卓,吴琪,等.AC7A 铝镁合金动圈骨架夹渣和缩松缺陷的解决措施[J].热加工工艺, 2016, 45(13): 113-116.
[6] 苏大为,赵玉涛.低压铸造铝合金轮毂充型和凝固过程模拟分析[J].特种铸造及有色合金, 2007, 27(9): 682-684, 653.

[7] 杨闯,苏小平,周大双,等.铝合金悬架摆臂低压铸造数值模拟与工艺优化[J].铸造技术, 2021, 42(5): 371-374.
[8] 朱慧明,苏小平,昂飞.铝合金制动器卡钳低压铸造工艺设计及优化[J].热加工工艺, 2022, 51(21): 54-56, 60.
[9] 黄志豪. 铝合金机匣低压铸造过程数值模拟及工艺研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
[10] KERMANPUR A, MAHMOUDI S, HAJIPOUR A. Numerical simulation of metal flow and solidification in the multi-cavity casting moulds of automotive components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206(1-3): 62-68.
[11] VISWANATH A, MANU M V, SAVITHRI S, et al. Numerical simulation and experimental validation of free surface flows during low pressure casting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 244: 320-330.
[12] 姜不居.铸造手册(第 6 卷):特种铸造[M].北京:机械工业出版社, 2010.
[13] 邱孟书,王小平. 低压铸造实用技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.

(编辑:张正贺)