

铝合金电机壳低压铸造数值模拟及工艺优化

程 颖¹ 王淇奥¹ 钱晨晖² 周利伟² 杜 明³ 张花蕊^{1,2,3}

(1.北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院; 2.诸城航大新材料技术有限公司;
3.北京航空航天大学宁波创新研究院)

摘 要 采用 MAGMA 模拟软件对铝合金水冷电机壳低压铸造充型和凝固过程进行了模拟,预测了铸造缺陷产生的区域并分析了原因,在此基础上优化了铸造工艺方案并进行了试验验证。结果表明,通过分析模具温度场,合理调整模具结构并增设冷却通道以增强冷却效果,可以有效减少缩孔、缩松缺陷。按照优化后工艺生产的电机壳性能得到显著提高,且品质和性能指标均满足使用要求。

关键词 电机壳;低压铸造;数值模拟;工艺优化

中图分类号 TG249.2;TG146.28;TP311

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation and Process Optimization of Low-pressure Casting for Aluminum Alloy Motor Shell

Cheng Ying¹, Wang Qi'ao¹, Qian Chenhui², Zhou Liwei², Du Ming³, Zhang Huarui^{1,2,3}

[1.Research Institute for Frontier Science, Beihang University; 2.Hangda Material Technologies (Zhucheng) Co., Ltd.; 3.Ningbo Institute of Technology, Beihang University]

Abstract: The casting process simulation software MAGMA was adopted to simulate the filling and solidification process of the low-pressure casting for aluminum alloy motor shell. The generation area of casting defects was predicted and the causes were analyzed. On this basis, the solidification process was optimized and verification experiment was conducted. The results indicate that the shrinkage cavity and porosity defects can be effectively reduced by analyzing mold temperature field, properly adjusting the mold structure and adding cooling channels to enhance the cooling effect. The performance of the motor shell produced by the optimized process was remarkably improved, where all quality and performance indicators meet the practical requirement.

Key Words: Motor Shell, Low-pressure Casting, Numerical Simulation, Process Optimization

轻量化是航空航天飞行器性能提升、燃油汽车节能减排、新能源汽车降耗增程的最重要途径之一。铝合金除具有轻质的特点外,还具有良好的成形性和耐腐蚀性,是一种非常理想的轻量化材料。用铝合金代替传统钢铁材料,可以起到非常明显的减重效果。在大多数汽车零部件中,相比于其他材料,铝合金可在不影响安全性的前提下,可实现减重 50% 以上^[1]。新能源汽车电机壳是铝合金材料在汽车轻量化上的主要应用场景之一,其是一种空间结构复杂的薄壁壳类零件,适合低压铸造(充型压力为 0.02~0.07 MPa)生产。将仿真技术与实际生产相结合,能够缩短产品的设计和试制周期,降低生产成本。美国铸造联合会的调查报告显示,利用计算机铸造仿真技术可以缩短 40% 的产品试制周期,降低 30% 的生产成本以及提高 25% 的材料利用率^[2,3]。

铝合金电机壳内部通常设有复杂的水冷通道来对电机进行降温。电机壳体作为冷却系统的外壁和附着物的载体,要求不能出现渗漏、变形等,因此对其气密性和力学性能要求较高。目前铝合金电机壳在生产过程中常出现的问题是缩孔、缩松较多,致密性不够,气密性很难保证。本课题以薄壁铝合金水冷电机壳铸件为研究对象,采用 MAGMA 软件对其低压铸造过程中的充型和凝固过程进行模拟,分析铸造过程中可能产生的缺陷及其原因。在此基础上,对铸造工艺方案进行优化并通过生产试制来验证优化方案的有效性。

1 电机壳结构分析及质量要求

以国内某汽车用铝合金水冷电机壳体为研究对象,

收稿日期:2021-06-20

第一作者简介:程颖,男,1991 年出生,博士研究生,北京(100191),E-mail: cying@buaa.edu.cn

通信作者:张花蕊,女,1984 年出生,副教授,北京(100191),E-mail: huarui@buaa.edu.cn

引用格式: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.

CHENG Y, WANG Q A, QIAN C H, et al. Numerical simulation and process optimization of low-pressure casting for aluminum alloy motor shell[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):802-808.

其结构见图 1。主要特点为:壁厚不均匀,中间较薄,四周较厚,且形状复杂,外轮廓近似圆柱形,孔和加强筋较多。电机壳结构大致沿中心轴承孔径向扩展,质量为 8.89 kg,材质为 A356 铝合金,外形轮廓尺寸约为 290 mm×220 mm×180 mm。铸件厚度主要集中在 6~10 mm,其中最厚处为 20 mm,最薄处为 5 mm。除外形复杂外,电机壳内部还具有复杂的水冷通道,因此生产难度较大,容易产生缺陷(见图 2),导致产品品质难以控制,合格率不高。

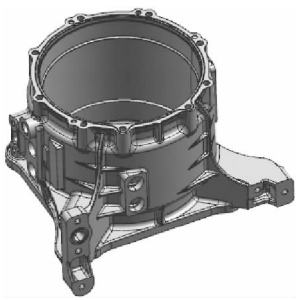


图 1 铝合金电机壳结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the aluminum alloy motor shell

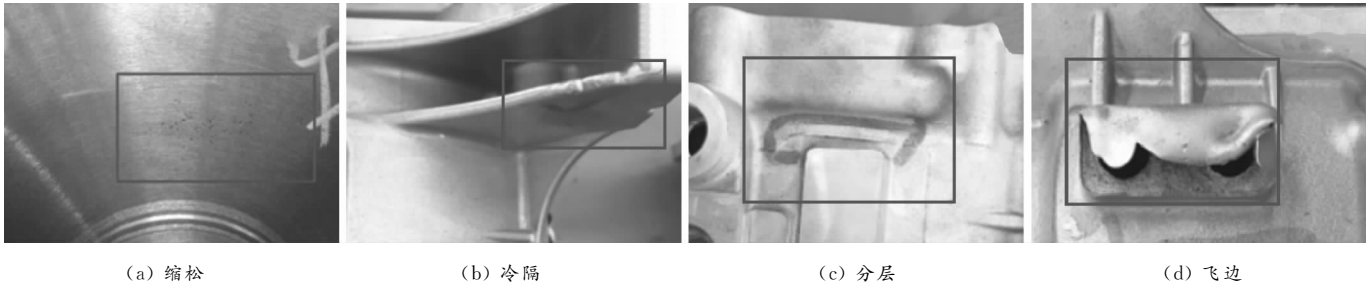


图 2 铝合金电机壳常见铸造缺陷

Fig.2 Common casting defects in aluminum alloy motor shell

该电机壳的品质要求为,电机壳体铸件在 510 kPa 压力下保持 130 s 不泄漏;抗拉强度 ≥ 260 MPa,屈服强度 ≥ 190 MPa,伸长率 $\geq 3.5\%$,硬度(HB) ≥ 85 。另外,电机壳体铸件机加工之后表面不允许有裂纹、冷隔、缩松、浇不足等缺陷。

2 初始工艺方案模拟结果分析

2.1 初始工艺方案

低压铸造浇注速度可控,充型平稳,可以有效防止氧化夹渣的产生,而且铸件在一定压力下充型及凝固,成形性好、组织致密度高、力学性能好^[4];通过浇注系统进行补缩,不需额外设置冒口,工艺收得率高,劳动条件好,生产效率高^[5],因此采用低压铸造工艺进行该电机

壳的制造。

根据铸件结构特点,将模具设计成对开式金属型,铸型主体包括契合电机壳内腔结构设置的上模、沿分型面设置的下模和分为 4 部分的侧模,内部冷却水道采用砂芯成形。浇注系统采用底注式,该电机壳铸件底部为尺寸相对较大的圆形平面,因此按照厚大平面在下的原则将铸件竖直放置^[6]。此外,由于在电机壳底部轴心处设有一个钢制嵌件,导致铝液刚进入型腔就会形成快速的温度下降趋势,冷却速度非常快,不利于后续的充型和凝固,因此将浇注系统定为双浇口形式。铸型和砂芯材料选用 H13 模具钢,铸型、砂芯和浇口的结构见图 3。铸造过程中的主要工艺参数:模具预热温度为上模和侧模 350 ℃,下模为 380 ℃;浇注温度为 710 ℃;充型压力为 22~44 kPa。

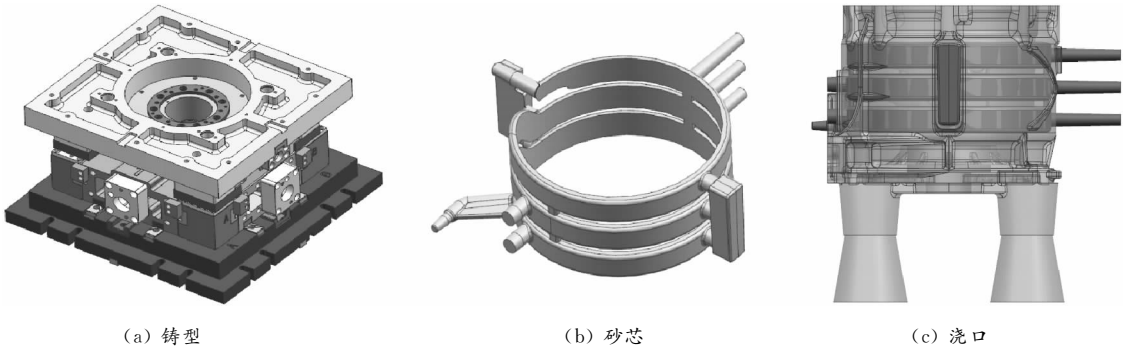


图 3 铸型、砂芯和浇口结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the mold, core and sprue

2.2 充型过程模拟结果分析

充型过程中合金液流动情况见图 4。图 4a~图 4f

分别对应着充型 15%、30%、50%、60%、75% 和 100% 时的流动温度场。充型初始,铝液先从内浇道进入到模

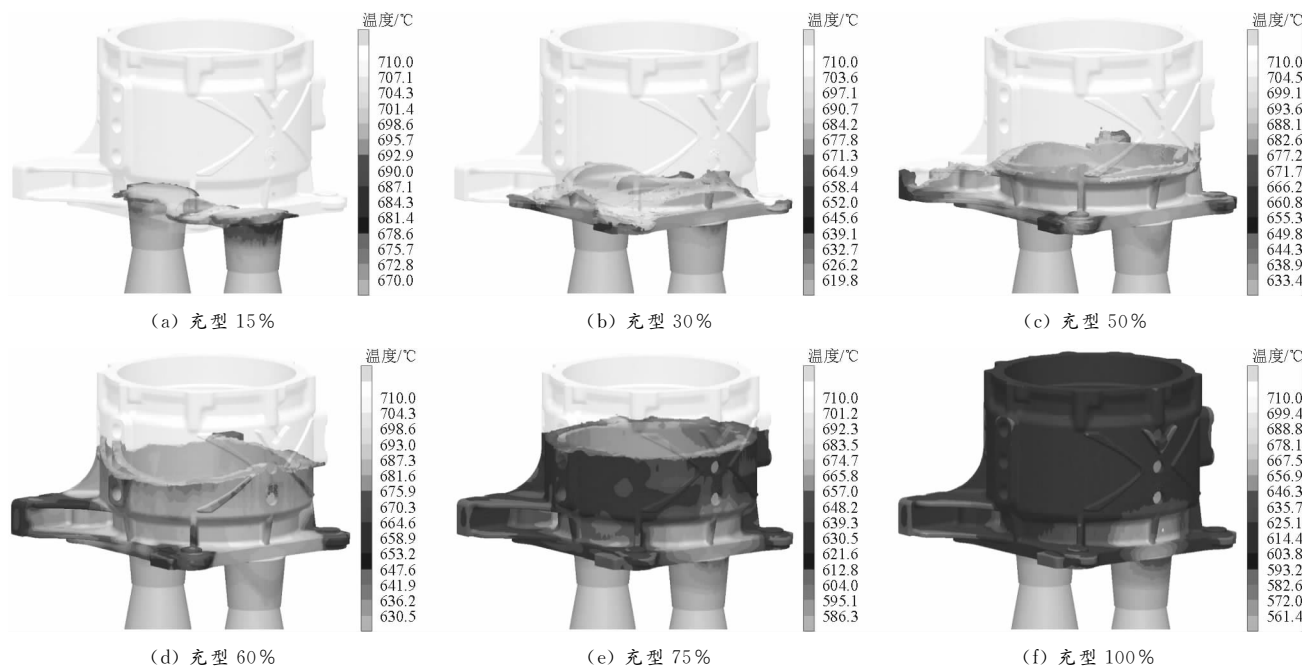


图 4 初始方案充型过程温度场

Fig.4 Temperature field during mold filling process under initial design condition

具型腔,然后以内浇道为中心径向分散流动,两个流道同时对型腔进行填充。先是填充铸件下端面,由于截面积突然变大,会发生液面紊乱情况;当充型进行到 50% 时,电机壳体下端面基本已经充型完成,液面逐渐恢复平稳并缓慢上升,逐层填充铸件水道及上缘;当充型进行到 60% 时,已经开始第二层水道的充型,液面没有出现飞溅、喷射现象,能够避免冲断砂芯造成水道堵塞,也未出现多股金属液流交汇的现象;当充型进行到 75% 时,液面进入非常平稳的逐层上升状态,能够最大限度

地排除型腔内气体,避免气体卷入合金液中,降低氧化夹渣出现的可能性。充型完成时,金属液最低温度仍在 593 ℃ 以上,冷隔或浇不足风险较低。因此,浇注系统和参数的初始工艺方案能够满足铸件的充型要求。可以看出低压铸造时,铝液在反重力的情况下,通过压缩空气的压力从下往上被推入模具型腔内,整个填充过程缓慢平稳,不存在高速充型乱流以及碰撞后卷气的现象。

2.3 凝固过程模拟结果分析

凝固过程中型腔内铝液的固相率分布情况见图 5。

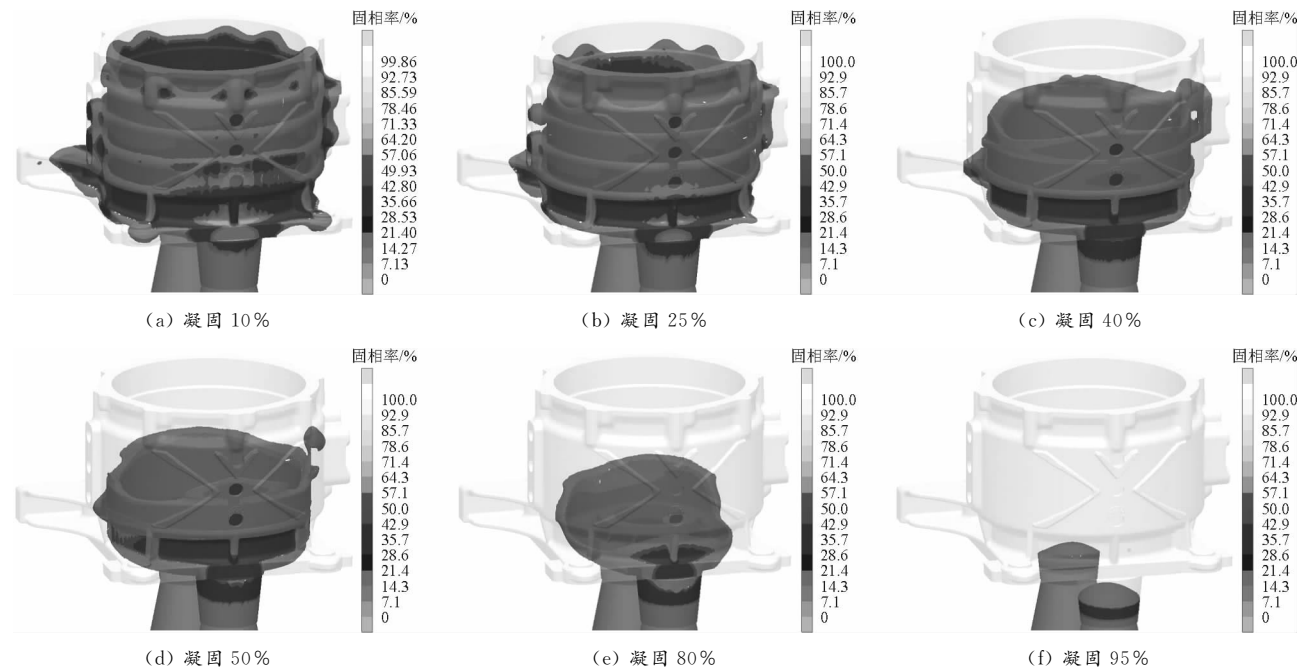


图 5 初始方案凝固过程固相率分布

Fig.5 Solid fraction distribution during solidification process under initial design condition

图 5a~图 5f 分别是铸件凝固过程进行到 10%、25%、40%、50%、80% 和 95% 时的固相率分布情况。

由图 5a 可知,铸件上缘以及下端薄壁处率先开始凝固,此时铸件绝大部分区域温度都在固相线温度以上,但是下端在凝固过程中出现了小块孤立液相区。由图 5b 可知,水道的出、入水口部位由于砂芯占据空间大且壁厚大,凝固速度相对较慢,补缩通道较长;由图 5c 和图 5d 可知,水道的出、入水口部位出现了非常明显的孤立液相区,得不到有效补缩,体积比较大且孤立时间较长,极有可能在最后产生缩松、缩孔缺陷;由图 5e 可知,铸件自上而下凝固时,在最下层砂芯处出现了比较大的孤立液相区,推测也是由于砂芯处散热速度较慢所致;图 5f 为电机壳体基本完全凝固时的状态。整个凝固过程中,除了个别位置外都能有效地保证铸件自上而下顺序凝固,确保金属液得到充分的补缩,而凝固过程中由于体积收缩,铸件中出现孤立液相区的位置很有可能在凝固完成后出现缩孔、缩松缺陷。

在初始工艺方案条件下所获得铸件的孔隙分布模拟结果见图 6。铸造结束时铸件的总孔隙率为 5.9%,铸件缩孔、缩松缺陷的分布基本上与凝固过程中出现孤立液相区的区域相吻合,主要是铸件出、入水口部位以及最下层砂芯附近。产生缩孔、缩松的原因一方面是因为此处壁厚比较大,体积收缩大;另一方面是因为此处的砂芯导致散热不好,冷却速度大幅降低,形成明显的热节,补缩困难。在之后的方案优化中,应着重关注这两点。

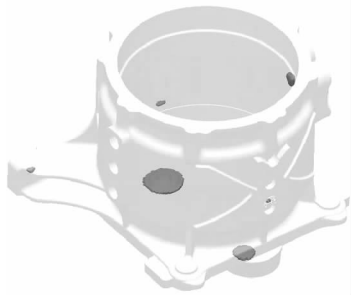


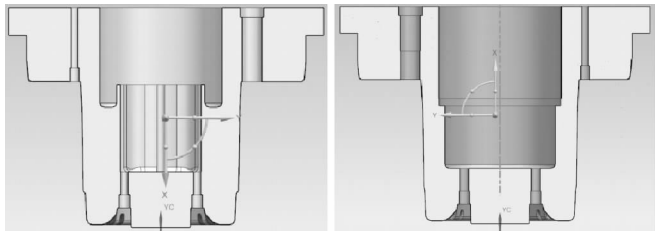
图 6 初始方案的缩孔缩松缺陷模拟结果
Fig.6 Simulation results of shrinkage cavity and porosity under initial design condition

3 工艺方案优化

3.1 模具结构改进

考虑到上模整体温度比较高,凝固速度比较慢,且缩松主要集中于圆筒壁部分,见图 7。对上模进行改进:减小上模钢芯底部的直径,增大此处浇注系统的截面积,避免铸件上部补缩通道过早断开,增强铸件上部

的补缩程度,保证上缘及水道位置的成形品质,增强最底层砂芯处的冷却程度。



(a) 初始方案 (b) 改进方案
图 7 模具结构改动示意图
Fig.7 Schematic diagram of mold structure modification

3.2 冷却系统改进

根据初始工艺方案模拟结果,缺陷主要集中在上模钢芯影响区内,这是由于铸造过程中钢芯温度会有明显上升,不利于铸件的冷却和补缩,从而造成缩孔、缩松缺陷。因此,考虑对模具进行强制冷却。由于上模钢芯壁厚较薄,不宜布置水冷通道。同时,出于保证安全性的考虑,选择空气作为冷却介质。在上模钢芯内部对应于砂芯的位置设置环形冷却通道,以加强上模钢芯处的冷却强度,见图 8。

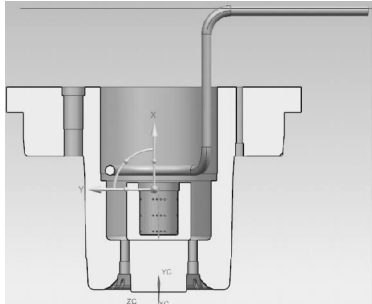


图 8 冷却通道示意图
Fig.8 Schematic diagram of the cooling channels

3.3 改进方案模拟结果

改进方案的充型过程中合金液流动情况见图 9。与初始工艺方案相同,在改进方案条件下的充型过程仍能满足要求。当金属液完全充满型腔时,铸件整体温度仍然高于固相线,并未出现部分区域提前凝固的现象。充型过程中,液面基本处于平稳的逐层上升状态,不存在高速充型乱流以及碰撞后卷气现象,能够最大限度排除模腔内气体,减少卷入合金液中的气体量,降低氧化夹杂出现的概率。

改进方案的凝固过程中型腔内铝液的固相率分布情况见图 10。图 10a~图 10f 分别为铸件凝固过程进行到 2%、25%、40%、60%、80% 和 95% 时的固相率分布情况。下端薄壁处由于最早进入型腔且模具的激冷作用较强而率先开始凝固;随后是铸件的上缘位置和安装端面的远端,水道的出、入水口部位由于砂芯占据

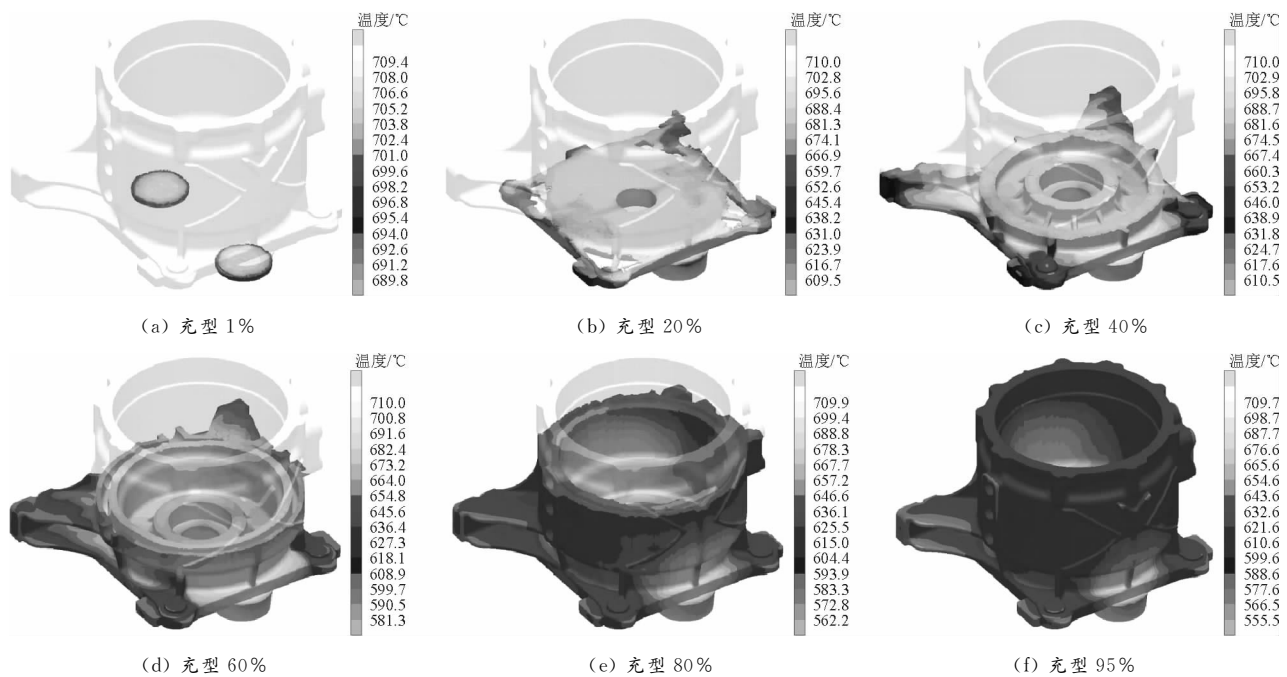


图 9 改进方案充型过程温度场

Fig.9 Temperature field during mold filling process under modified design condition

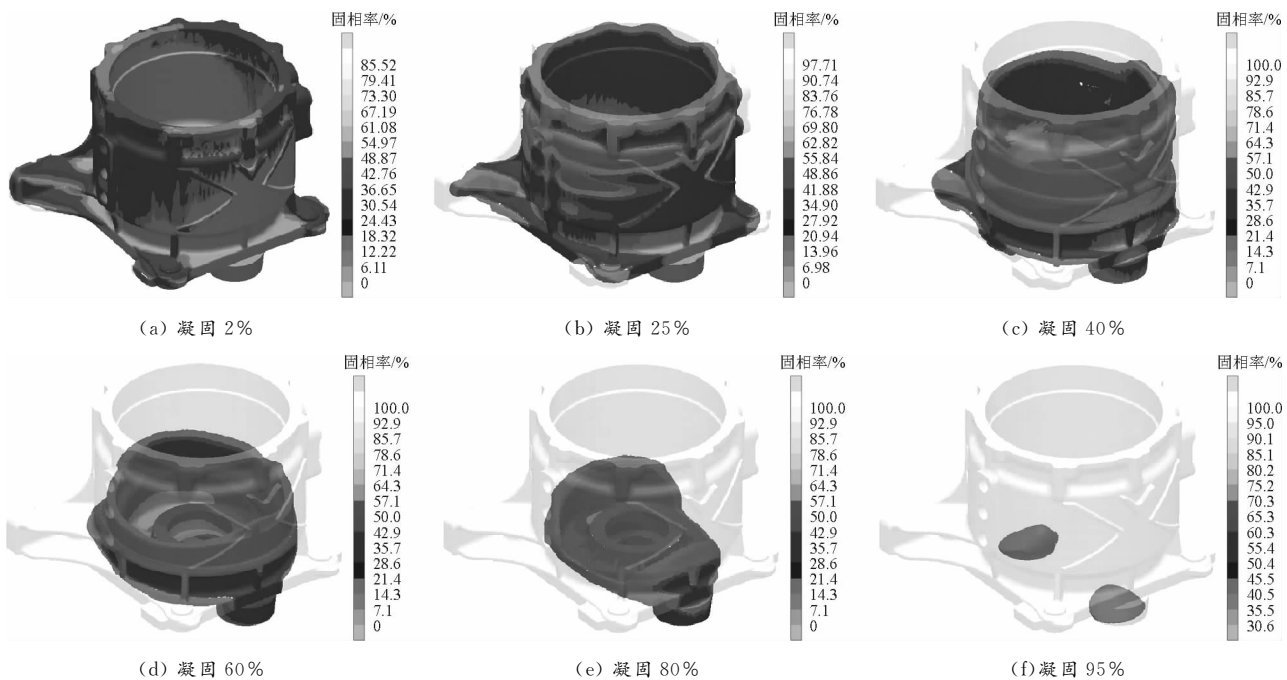


图 10 改进方案凝固过程固相率分布

Fig.10 Solid fraction distribution during solidification process under modified design condition

空间大且壁厚大,凝固速度相对较慢,补缩通道较长,比相同高度的其他部位更晚凝固,但是并未出现孤立液相区;由于砂芯的存在,下层水道凝固速度也相对较慢,图 10f 为铸件基本完全凝固的状态。可以看出整个过程中铸件保持了自上而下的顺序凝固,没有出现孤立液相区,初始工艺方案中热节部位的金属液得到充分补缩,可以有效避免缩孔、缩松缺陷。

在改进方案条件下所获得铸件的孔隙分布模拟结果见图 11。相比于初始工艺方案,孔隙被明显消除,



图 11 改进方案的缩孔缩松缺陷模拟结果
Fig.11 Simulation results of shrinkage cavity and porosity under modified design condition

出、入水口部位不再出现明显的缩孔、缩松。凝固结束时,铸件孔隙率由 5.9%降至 1.7%。

4 生产试制验证

在上述模拟分析和工艺方案优化的基础上,采用改进后的工艺方案进行了铝合金电机壳的生产试制。经过制芯、铝合金熔炼、砂芯及模具准备、浇注、取件、热处理、机加工等工序后完成铸件试制,随后进行 X 射线探伤、气密性及力学性能测试。试制所得电机壳见图 12,机加工之后表面品质符合要求,未出现裂纹、冷隔、缩松、浇不足等缺陷。



图 12 按照改进后工艺方案制备所得电机壳实物图
Fig.12 Entity of motor shell produced according to the modified production process

4.1 X 射线探伤结果

图13为电机壳X射线探伤结果,在铸件的上缘、

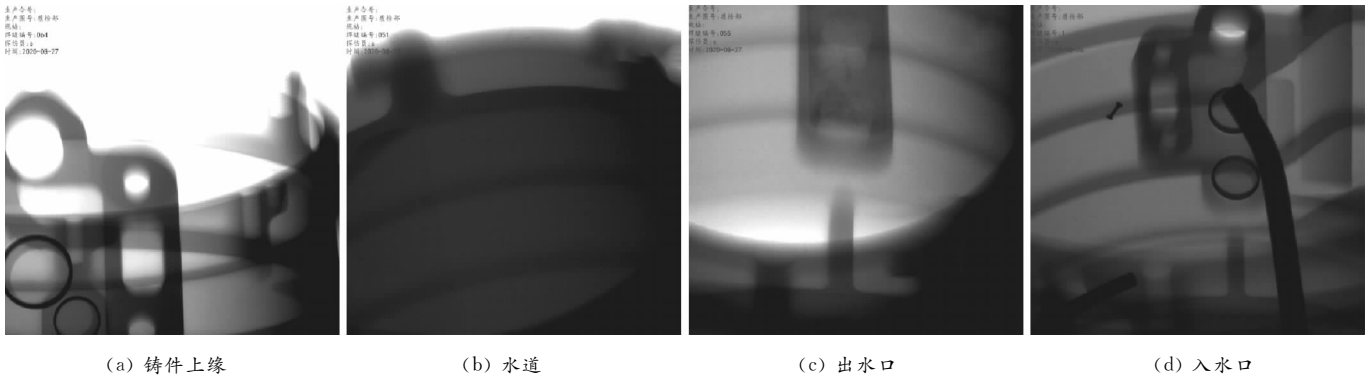


图 13 X 射线检测
Fig.13 X-ray inspection

出水口、入水口和水道处进行了检测,均满足缺陷标准要求,按改进后工艺方案试制的铸件内部品质合格。

4.2 气密性测试结果

气密性的检测方法见图 14。在用碗形塞堵住为固定砂芯以及震砂预留的孔洞之后,用自行设计的工装将电机壳内部的环形水冷通道封死,连接气管、压力表、减压阀和气源,向铸件内通入定量的 N₂。然后将铸件放入水中,当压力表设定值为 510 kPa 时,关闭气源,保持 130 s,观察电机壳体有无气泡产生或者压力值有无明显下降。对批量试制铸件的检测结果显示,气密性合格率达96%以上,按改进后工艺方案试制的铸件气密性

能够满足要求。

4.3 力学性能测试结果

在电机壳壁厚均匀、性能要求高的重要区域取样。选取出水口、入水口以及下端面 3 个位置,在每个位置取 3 个试样,分别测量各项力学性能后计算平均值,用该平均值来代表整个产品的性能,相应的力学性能测试结果见表 1。力学性能测试结果表明,按改进后工艺方案试制的铸件抗拉强度、屈服强度、伸长率和硬度均满足产品性能要求。

表 1 力学性能测试结果

Tab.1 Results of mechanical property tests				
	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度(HB)
测试值	285.6	208.3	6.5	102.8
要求值	≥260	≥190	≥3.5	≥85

5 结 论

(1)采用铸造模拟软件 MAGMASoft 对铝合金电机壳低压铸造工艺进行了模拟。结果表明,在铸造过程中,壁厚较大且散热缓慢的出水口和入水口处会出现孤立液相区,形成明显的热节,从而导致补缩困难,凝固完成后极易出现缩孔、缩松缺陷。

(2)通过模具结构改进和增设冷却通道的方式对低

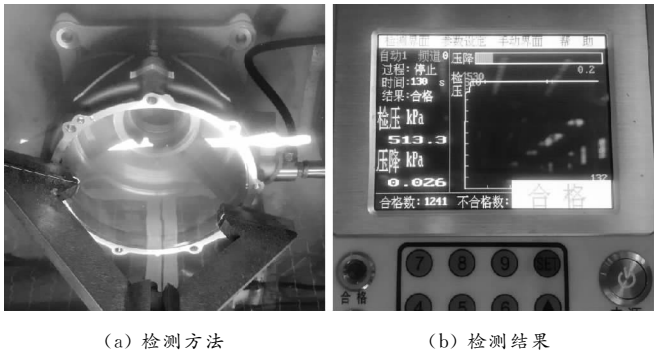


图 14 气密性检测
Fig.14 Gas tightness inspection

Ca 和 Mn 微合金化对 Mg-14Li-3Al-0.5Y 合金微观组织和力学性能的影响

刘文才¹ 孙家伟¹ 张泉达² 高占奎¹ 吴国华¹ 丁文江¹

(1.上海交通大学材料科学与工程学院,轻合金精密成型国家工程研究中心;
2.北京机科国创轻量化科学研究院有限公司)

摘要 通过在强度较高而塑性不足的 Mg-14Li-3Al-0.5Y 合金基础上分别添加微量 Ca、Mn 元素,以研究 Ca 和 Mn 微合金化对铸态合金微观组织和力学性能的影响。结果发现,添加微量 Ca 使合金中生成了分布于 β -Li 晶界的半连续网状 Al_2Ca 相,消耗了具有固溶强化效果的 Al 元素, β -Li 显著细化。微量 Mn 的加入使合金中生成了弥散分布于 β -Li 基体的含 Mn 相和 Al_2Mn_3 相,显著抑制了 β -Li 的长大。开发了具有超低密度(1.36 g/cm³)、高伸长率(11%)的新型 Mg-14Li-3Al-0.5Y-0.2Mn 合金,其屈服强度和抗拉强度分别达到 144 MPa 和 175.5 MPa。

关键词 Mg-Li 合金;单相 β -Li;显微组织;力学性能

中图分类号 TG146.22 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.003 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of Ca and Mn Microalloying on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-14Li-3Al-0.5Y Alloy

Liu Wencai¹, Sun Jiawei¹, Zhang Quanda², Gao Zhankui¹, Wu Guohua¹, Ding Wenjiang¹

(1.National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University; 2.Beijing National Innovation Institute of Lightweight Co., Ltd.)

Abstract: The influence of Ca and Mn microalloying on microstructure and mechanical properties of Mg-14Li-3Al-0.5Y alloy with high strength and low density was investigated. The results indicate that the addition of Ca leads to the formation of semi-continuous netlike Al_2Ca phase distributed in the β -Li grain boundary in the alloy, which consumes the Al element with solid solution strengthening effect and significantly refines the β -Li. The addition of Mn can generate the Mn phase and Al_2Mn_3 phase dispersed in the β -Li matrix in the alloy, which inhibits the growth of β -Li. The superlight Mg-14Li-3Al-0.5Y-0.2Mn alloy with ultra-low density (1.36 g/cm³) and high elongation (11%) was developed, of which the strength and tensile strength reach 144 MPa and 175.5 MPa, respectively.

Key Words: Mg-Li Alloy, Single Phase β -Li, Microstructure, Mechanical Properties

收稿日期:2021-04-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51771115,U2037601);先进成形技术与装备国家重点实验室开放基金资助项目(SKL2020005);航天一院高校联合创新基金资助项目(CALT2020-TS07)
第一作者简介:刘文才,男,1980 年出生,副研究员,上海(200240),E-mail: liuwc@sjtu.edu.cn
引用格式:刘文才,孙家伟,张泉达,等. Ca 和 Mn 微合金化对 Mg-14Li-3Al-0.5Y 合金微观组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):808-813.
LIU W C, SUN J W, ZHANG Q D, et al. Influence of Ca and Mn microalloying on microstructure and mechanical properties of Mg-14Li-3Al-0.5Y Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):808-813.

压铸工艺方案进行优化后,整个铸造过程中铸件可以保持平稳充型和自上而下的顺序凝固,并且不会出现孤立液相区,热节部位的金属熔体也能到充分补缩,可以有效避免缩孔、缩松缺陷产生。

(3)优化方案的有效性得到了生产试制结果的验证,按照优化工艺方案试制的铸件各项品质和性能指标均满足使用要求。

参 考 文 献

[1] 李家奇,杨钢,陈俊宇,等.汽车轻量化铝合金研究进展[J].云南冶金,2020,49(5):68-75.

[2] 范子杰,桂良进,苏瑞意.汽车轻量化技术的研究与进展[J].汽车安全与节能学报,2014,5(1):1-16.

[3] 柳百成.铸造技术与计算机模拟发展趋势[J].铸造技术,2005,26(7):611-617.

[4] 孙冬恩,程和法,周宏伟,等.低压铸造铝合金轮毂的数值模拟及工艺优化[J].特种铸造及有色合金,2020,40(7):763-767.

[5] 白清华.低压铸造大型壁厚不均铸件缩松的解决[J].特种铸造及有色合金,2009,29(5):434-435,388.

[6] 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:彭瑾)