铝合金电机壳低压砂型铸造工艺设计

金延竹[1, 2]，孙树臣[1]，王文权[3]，崔　伟[1]，冯海舟[1]，黄海波[1]，詹　健[1]

（1. 一汽铸造有限公司，吉林长春 130013；2. 吉林大学材料科学与工程学院，汽车材料教育部重点实验室，吉林长春 130025；3. 迈格码（苏州）软件科技有限公司，江苏苏州 215021）

摘要：以一款140 kW的铝合金水冷电机壳体做为研究对象，探讨了采用低压砂型工艺的电机壳的典型铸造工艺方案，并采用MAGMA软件进行工艺方案可行性的评估。结果表明，生产的电机壳体完全满足相关技术条件的要求。

关键词：铝合金电机壳；低压砂型铸造；工艺设计；MAGMA模拟

近年来，在节能减排和环保的需求下，汽车制造企业的研发重点正在由传统燃料汽车向新能源汽车转移。铝合金电机壳作为新能源汽车的动力总成核心铸件，结构比较复杂，铸造难度大。水冷电机壳体的侧壁环绕冷却水套的密封性是产品的重要技术要求，也是产品最大的铸造难点[1-2]。同时，电机壳体上、下端面以及侧壁的缩松也是工艺开发中需要避免的铸造缺陷[3-5]。随着计算机技术在铸造领域的迅速发展，通过铸造过程模拟仿真分析模拟可以预测铸造缺陷，评估工艺可行性[5-6]。

本文以一款140 kW的电机壳为研究对象，研究低压砂型工艺的铝合金电机壳铸造工艺设计，借助MAGMA模拟仿真手段进行铸造工艺的模拟分析，并对优化方案进行铸造过程分析，并进行工艺评估[6-7]。

1　电机壳技术要求

1.1　产品概述

电机壳体如图1a、b所示，产品的轮廓尺寸为228 mm × 307 mm × 296 mm，主要壁厚6 mm。侧方水套为螺旋结构（图1c），壁厚6.9 mm。产品重量为6.8 kg。材质为A356.2铝合金，采用T6热处理。铸件底部镶嵌轴承衬套（材质为45钢）。

1.2　技术要求

力学性能一般要求底面和顶面的硬度不低于HBW90，抗拉强度要求随炉试棒或指定的本体取样部位$R_m \geqslant 275$ MPa；伸长率≥2%。气密性要求水套在600 kPa下10 min无气泡泄漏；铸件表面及加工面不允许有气孔、缩松、冷隔、裂纹、夹渣等铸造缺陷；铸件内部缺陷需控制在ASTM E155 III级。

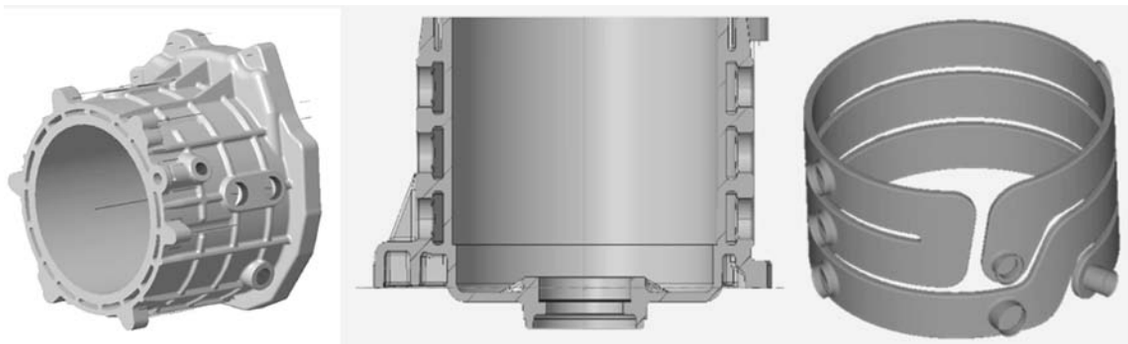
2　电机壳的铸造工艺设计

铸造方案选择：该电机壳采用低压砂型铸造方式。冒口设计：如图2所示，根据产品结构特点，在铸件顶部螺栓孔位置设置多个冒口，冒口有以下三个方面的作用：①可以实现对电机壳顶部法兰面（尤其是法兰面螺栓孔）位置的补缩；②有利于铸件顶部区域的排气和排渣，避免产品顶部出现渣孔或气孔缺陷；③间接提升了型腔中顶部区域金属液的热模数，使铸件和浇注系统在凝固过程形成更合理的顺序凝固，有助于避免电机壳体侧壁螺旋水套周围出现缩松。冒口的直径40~60 mm，冒口高度在50~70 mm范围内选取。浇道设计：根据产品结构特点，壳体底部浇注系统可以

作者简介：
金延竹（1982–），男，硕士，副高级工程师，研究方向重力及低压铸造工艺开发及铸造模拟仿真。电话：18686538394，E-mail：jinyanzhu2009@163.com

中图分类号：TG292
文献标识码：B
文章编号：1001-4977（2022）02-0198-05

收稿日期：
2021–07–21 收到初稿，
2021–08–17 收到修订稿。



（a）电机壳结构　（b）电机壳剖面结构　（c）电机壳水套结构

图1　电机壳铸件及水套结构

Fig. 1 Structure of the motor shell casting and water jacket

采取直浇道直接进料的方式即可满足产品充型过程的金属液流动平稳性和凝固过程浇口位置对铸件下方区域的补缩。浇道直径设计为60~85 mm范围内，冒口和浇道具体的设计数值通过MAGMA铸造模拟软件的虚拟DOE分析来确定。为了实现凝固过程中铸件下方区域的顺序凝固，在镶嵌件（轴承衬套）周围区域添加起模斜度，并将壁厚增加2 mm。

3　工艺模拟仿真分析

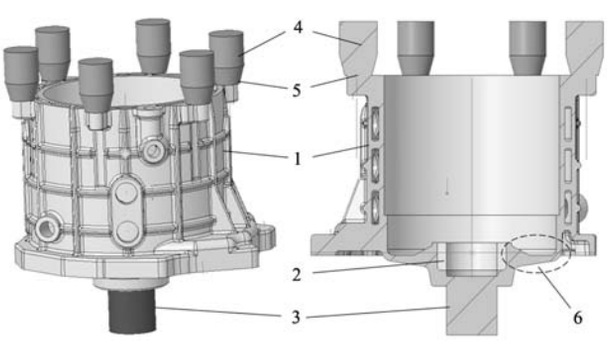
3.1　浇冒口系统的 DOE 分析

利用DOE（虚拟正交试验）可以快速将该电机壳冒口直径、冒口高度和浇道直径设为DOE分析的三个变量，共12个浇注系统设计方案（表1）。DOE分析目标为铸件的冒口附近及浇口附近区域（图3）缩孔缩松倾向最低。

通过DOE分析，方案5、6、11和12为四个缩孔缩松倾向最低的最优方案设计，考虑到工艺出品率，确认方案5为最优工艺，（即冒口直径50 mm，冒口高度70 mm，浇道直径60 mm）

3.2　选定方案的铸造过程模拟

通过对电机壳选定方案5进行铸造过程的模拟仿真分析，充型过程的金属液流态和温度场分析如图4所示，整个充型过程，金属液流动平稳，未出现紊流



1. 铸件　2. 镶嵌件　3. 浇道　4. 冒口　5. 冒口颈　6. 更改结构的区域

图2　电机壳冒口及浇注系统设计

Fig. 2 Design of the risers and gating system of the motor shell

表1　冒口及浇注系统设计虚拟正交试验（V-DOE）

Table 1 Virtual-DOE of the design of the riser and gating system

序号	工艺方案	冒口直径/mm	冒口高度/mm	浇口直径/mm
1	方案1	40	50	60
2	方案2	50	50	60
3	方案3	60	50	60
4	方案4	40	70	60
5	方案5	50	70	60
6	方案6	60	70	60
7	方案7	40	50	85
8	方案8	50	50	85
9	方案9	60	50	85
10	方案10	40	70	85
11	方案11	50	70	85
12	方案12	60	70	85

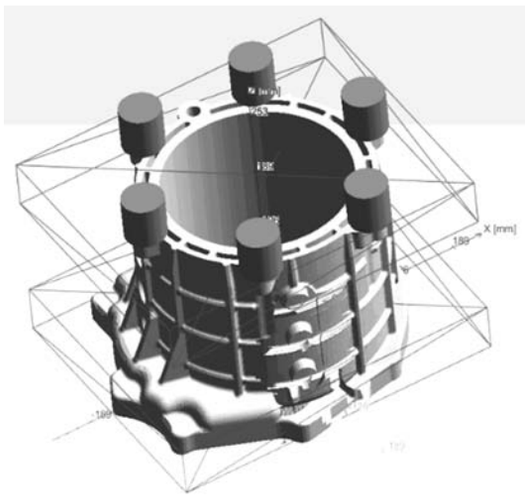


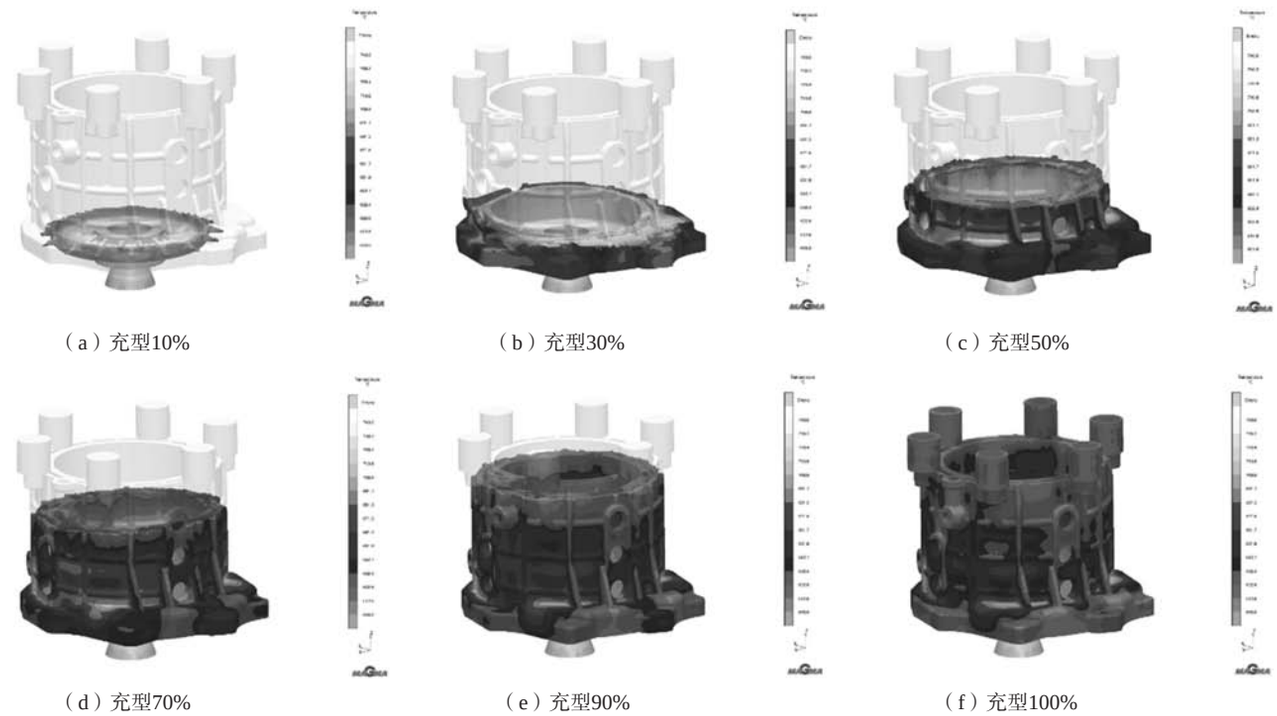
图3　MAGMA-DOE分析的评估区域

Fig. 3 Evaluation area of the MAGMA-DOE analysis

和喷溅现象；金属液降温状态也理想，直至充型末尾（图4e-f），金属液温度也在液相线温度以上，出现冷隔或气孔的风险较低。通过充型过程的示踪粒子分析（图5），金属液充型平稳，未出现卷气、打旋的现象。

凝固过程的液相率分析如图6所示。可见，基本实现了理想的顺序凝固方式，铸件终检薄壁处优先凝固，冒口和浇道最后凝固，型腔内未出现孤立液相区。

通过对铸件的Porosity判据和Hot Spot FSTime判据的综合分析（图7），铸件内关键区域无缩孔缩松和热节，仅在铸件底部减重孔附近有轻微缩松。基于以上判据的分析，该工艺设计可以满足产品内部质量的要求。



（a）充型10%　（b）充型30%　（c）充型50%

（d）充型70%　（e）充型90%　（f）充型100%

图4　充型过程金属液温度及流态模拟

Fig. 4 Simulation of the temperature and flow pattern of the liquid metal during filling process

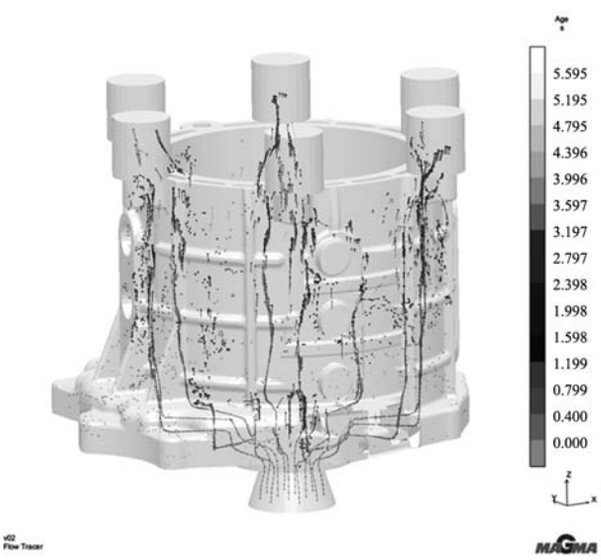


图5　示踪粒子模拟结果

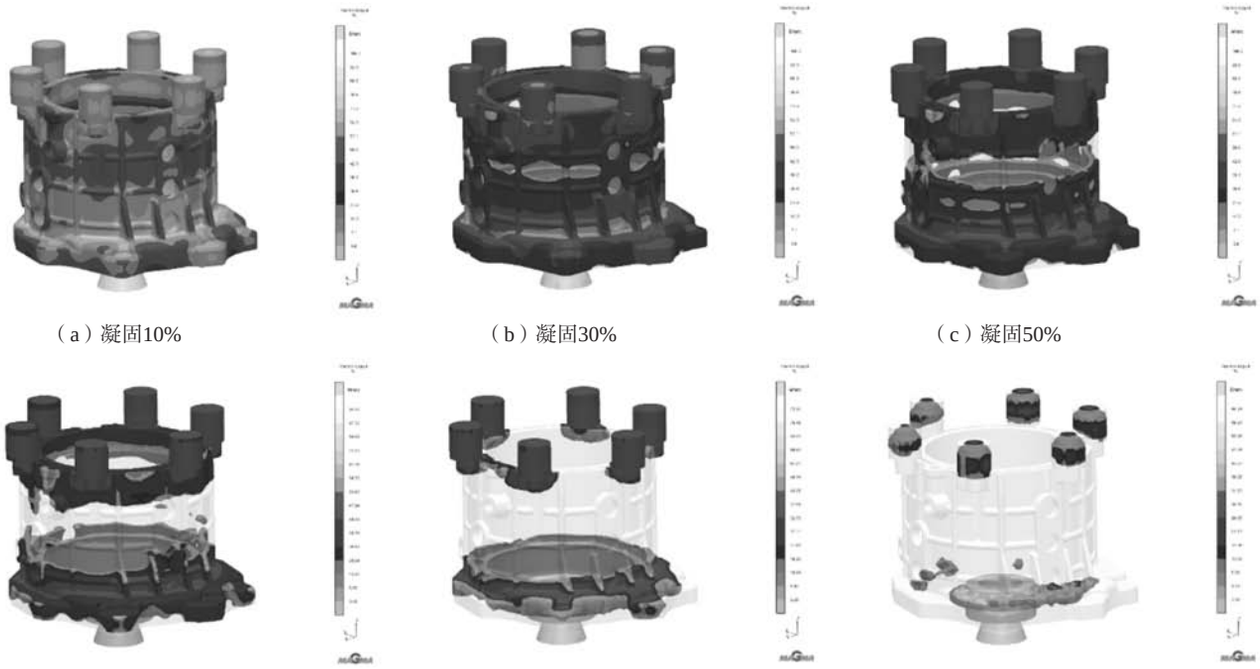
Fig. 5 Simulation results of the tracer particles

4　生产验证

采用上述铸造方案进行了生产试制，外侧轮廓芯采用冷芯盒制芯，成形部位的砂芯采用70~140目数覆膜砂，浇道及冒口部位采用50~100目数的覆膜砂；水套芯采用热芯盒进行制芯，使用50~100的宝珠砂，以便于水套内腔的清砂，砂包如图8所示。

铝合金液的炉前处理采用常规的Al-Sr变质和Al-Ti-B细化，采用旋转除气法进行除气，浇注温度725 ℃，升液时间5 s，充型时间10 s，保压过程的增压压力50 mbar，保压150 s后送冷却线自然冷却，2 h后进行打箱。

实际生产的铸件如图9a所示，铸件检测合格，未出现外部或内部缺陷，对图9a中的关键区域I和II进行X射线探伤检测（图9b、c）所示）合格，产品打压试漏也合格。

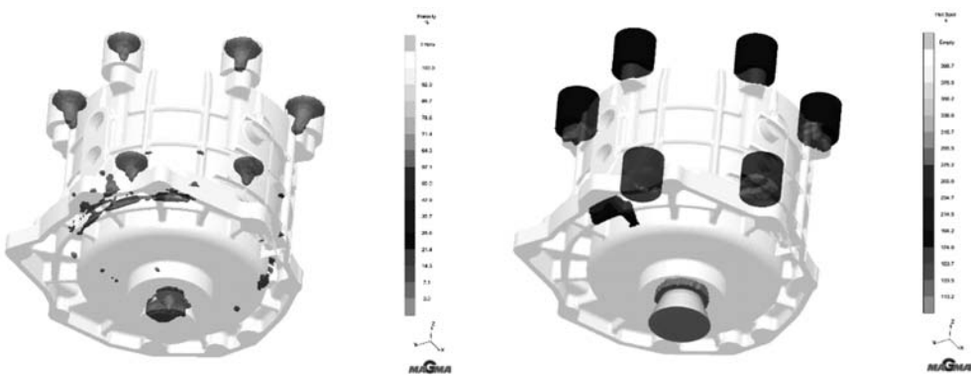


（a）凝固10%　（b）凝固30%　（c）凝固50%

（d）凝固70%　（e）凝固90%　（f）凝固100%

图6　凝固过程的凝固液相率

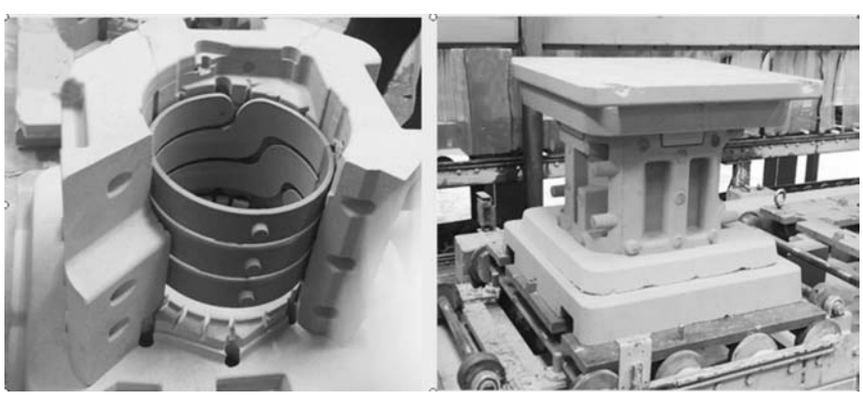
Fig. 6 Liquid fraction during solidification process



（a）Porosity判据　（b）Hot Spot FSTime判据

图7　电机壳缩松风险分析

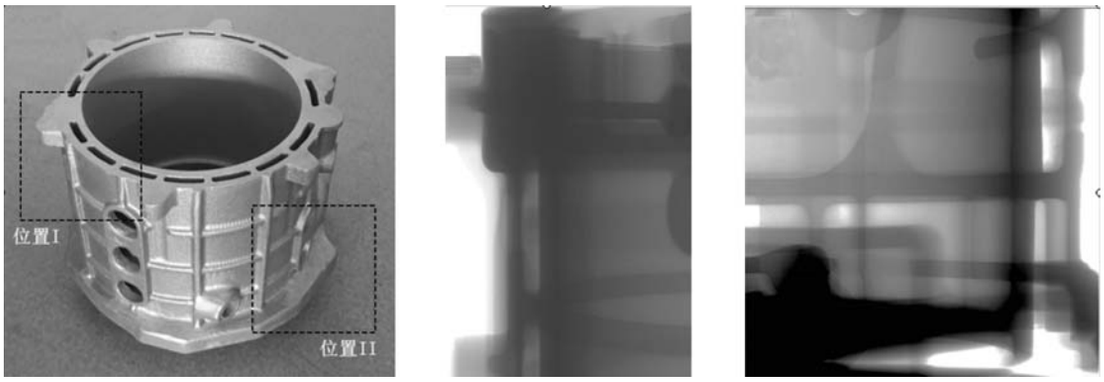
Fig. 7 Risk analysis of the shrinkage



（a）组芯过程　（b）组好的砂包

图8　拼组过程中的砂型及待浇注的砂包

Fig. 8 Sand cores during assembly and sand mold before poring



（a）实际生产铸件及X射线探伤区域　（b）位置I探伤结果　（c）位置II探伤结果

图9　实际生产铸件及检测位置的X射线探伤结果

Fig. 9 Actual produced casting and X-ray detection results at the detection locations

5　结论

（1）低压砂型工艺是生产铝合金水冷电机壳体的可行的铸造方式，只要电机壳冒口和浇注系统设计合理，可以生产出合格的电机壳体。

（2）MAGMA软件为产品工艺设计提供很大便利，利用MAGMASOFT®的DOE分析，可以快速从众多铸造方案中找到理想的方案；通过充型过程和凝固过程的风险分析，可以对铸造工艺的设计进行准确评判。

参考文献：

[1]　陈宇姗，韩伟，刘楚生，等. 电动汽车电机壳螺旋砂芯射芯机控制系统设计 [J]. 铸造，2019（11）：1261–1265.

[2]　颜建，段海峰，韩伟，等. 低压铸造电动机壳螺旋水道砂芯清理机设计 [J]. 铸造，2019（3）：291–294

[3]　董丽丽，余剑，朱克非. 电动客车用电机壳体设计 [J]. 汽车设计，2018（7）：98–100.

[4]　尚显光，胡玉昆，历长云，等. 铝合金电机壳体的铸造工艺设计与优化 [J]. 热加工工艺，2012（21）：64–67，70.

[5]　梁秋华，韩伟，黄凌森，等. 水冷机壳低压铸造凝固过程数值模拟及工艺优化 [J]. 铸造，2019（11）：353-358.

[6]　MATHIEU Weber. 基于MAGMA5的虚拟试验和自主优化技术开发稳健的产品和工艺 [C]//2017中国铸造活动周论文集，沈阳：全国铸造学会，2017.

[7]　毛红奎，徐宏. 铸造过程模拟仿真及工艺设计 [M]. 北京：国防工业出版社，2011.

Process Design of Low Pressure Sand Casting for Aluminum Alloy Motor Shell

JIN Yan–zhu[1, 2], SUN Shu–chen[1], WANG Wen–quan[3], CUI Wei[1], FENG Hai–zhou[1], HUANG Hai–bo[1], ZHAN Jian[1]

(1. FAW Foundry Co., Ltd., Changchun 130013, Jilin, China; 2. Key Laboratory of Automobile Materials, Ministry of Education and Department of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, Jilin, China; 3. MAGMA Engineering (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215021, Jiangsu, China)

Abstract:

Taking a 140 kW aluminum alloy water-cooled motor shell as the research object, the typical casting process of the motor shell using low-pressure sand casting technology was discussed. MAGMASOFT was used to evaluate the feasibility of the process design. The results showed that the motor housing can meet the requirements of related technical conditions.

Key words:

aluminum motor shell; low pressure sand casting; process design; MAGMA simulation

（编辑：张允华，zyh@foundryworld.com）