

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2023.1461

# 铝合金舱体低压铸造工艺

邓宏强,李明杰,邓梅梅,杨小林,张晓兵

(中铁高铁电气装备股份有限公司,陕西宝鸡721000)

**摘要:**铝合金舱体属于回转体桶壁类铸件,产品壁厚不均匀,热节分布在上、中、下3个部位,且是全加工产品,加工后产品不能出现任何铸造缺陷,需外观、尺寸、性能均符合要求。本文以铸件结构为基础,结合低压铸造设备,对产品的浇注系统、金属型结构、工艺参数等方面进行了分析。结果表明,金属型配合砂芯设计产品的浇注系统,可将浇注系统埋入砂芯中,实现浇注系统对产品热节部位的充分补缩,合理的加工余量可实现最少的原材料消耗,适合的金属型结构和工艺参数可实现产品的稳定充型和连续生产。

**关键词:**铝合金舱体;热节;砂芯;浇注系统

中图分类号: TG245

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2023)12-1163-05

## Low Pressure Casting Process of an Aluminum Alloy Cabin

DENG Hongqiang, LI Mingjie, DENG Meimei, YANG Xiaolin, ZHANG Xiaobing

(China Railway High-speed Railway Electrical Equipment Co., Ltd., Baoji 721000, China)

**Abstract:** Aluminum alloy cabins are a type of revolving barrel wall casting, in which the wall thickness is uneven, and hot spots are distributed in the upper, middle and lower parts. It is a fully processed product, thus, after processing, the product must not show any casting defects, and needs to meet the requirements in appearance, size and performance. In this paper, based on the casting structure, combined with low-pressure casting equipment, process research and analysis of the product's pouring system, metal structure, process parameters, etc., are carried out. Practical results show that the gating system of the product designed with a metal mold and a sand core can be embedded in the sand core, so that the pouring system can fully feed the hot spots of the product. A reasonable processing allowance can achieve the least raw material consumption. Suitable metal structures and process parameters can realize stable filling and continuous production of products.

**Key words:** aluminum alloy cabin; hot spot; sand core; gating system

近年来,铝合金铸件以其密度小、强度高、导电导热性好、耐腐蚀性好等特点广泛应用于各种工况<sup>[1-3]</sup>。铝合金舱体作为大型铸铝件,应用于航空航天领域,使用时内部装配各类控制系统元器件。目前铝合金舱体主要采用熔模石膏型铸造、砂型铸造、差压铸造、重力铸造、低压铸造等生产工艺<sup>[4-8]</sup>。熔模石膏型、砂型铸造虽成本低廉,但由于每个铸型只能浇注一次,获得铸件后铸型即损坏,需重新造型,生产效率较低;差压铸造虽产品性能优越,但差压铸造设备投入大,对设备稳定性要求较高;重力铸造成本较低,但由于该种产品质量较大,单次浇注熔

体较多,对操作者浇注技能有很高要求,浇注过程中铸件易产生夹渣、气孔等铸造缺陷;低压铸造设备投入适中,能够采用金属型结合砂型成型工艺进行生产,生产效率高且产品质量稳定。本文讨论的铝合金舱体属于典型回转体结构,具有产品尺寸大、结构复杂、壁厚不均等特点,在铸造过程中容易形成独立热节,造成缩松、缩孔缺陷,且属于全加工产品,对内部质量和基体针孔度有很高的要求。本研究从铸件结构、浇注方案、低压金属型模具和砂芯结合生产方式、低压铸造工艺参数以及数值模拟等方面分析了该产品的低压铸造生产成型工艺<sup>[9-12]</sup>,旨在为同类型

收稿日期: 2021-12-08

基金项目: 陕西省技术创新引导专项(2021QFY02-02)

作者简介: 邓宏强,1980年生,大专,工程师。主要从事铝合金低压铸造和重力铸造方面的工作。Email: 780749857@qq.com

通讯作者: 李明杰,1989年生,硕士研究生,高级工程师。主要从事铝合金低压铸造和重力铸造方面的工作。Email: 359616496@qq.com

引用格式: 邓宏强,李明杰,邓梅梅,等. 铝合金舱体低压铸造工艺[J]. 铸造技术,2023,44(12): 1163-1167.

DENG H Q, LI M J, DENG M M, et al. Low pressure casting process of an aluminum alloy cabin[J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1163-1167.

产品铸造方案提供借鉴。

## 1 低压铸造工艺设计

### 1.1 产品技术要求

该铝合金舱体铸件材质为 ZL114A, 属于全加工产品, 要求所有加工面不能出现铸造缺陷, 因此加工前需对铸件毛坯进行 100%X 射线检测。检测标准 ASTM E155, 所有区域执行 I 级标准, 铸件内部不允许存在气孔、裂纹、缩松、夹杂物等缺陷。线性尺寸未注公差按 GB/T1804-m, 未注形位公差按 GB/T1184-H, 其余铸件尺寸公差按照 GB/T6414-1999 CT9 级执行。

### 1.2 铸件结构分析

该铝合金舱体产品的三维模型如图 1 所示, 外形尺寸为  $\phi 336.08 \text{ mm} \times 455 \text{ mm}$ , 最小壁厚为 2 mm, 最大壁厚为 37 mm, 整体为回转体结构, 产品中部有 4 个  $\phi 45 \text{ mm}$  圆形窗口, 一大一小 2 个方形窗口, 产品设计质量为 12.07 kg, 上、中、下 3 个位置壁厚较厚, 其余部位壁厚较薄, 这种结构会导致产品在铸造凝固阶段分段凝固, 不能顺序凝固, 厚大热节部位得不到充分补缩, 从而容易造成缩松、缩孔等铸造缺陷。因此, 设计该产品的浇注系统需考虑给予热节部位充分补缩。



图 1 铝合金舱体铸件三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of aluminum alloy cabin casting

### 1.3 铸件浇注系统方案确定

选用低压铸造浇注成型工艺。该产品内腔属于半封闭结构, 金属型芯无法脱模, 因此采用覆膜砂砂芯和金属型配合使用方式进行试制, 产品脱型后, 去除覆膜砂砂芯, 获得产品毛坯。

综合分析产品结构和设备特点, 设计产品的毛坯和浇注系统, 根据产品尺寸, 设计产品的加工余量, 同时考虑产品厚大部位的补缩情况, 确保产品浇注过程实现顺序凝固。浇注系统根据产品结构设计为阶梯式进料内浇口, 分别从上、中、下 3 个部位进料, 浇道设计在砂芯内部, 铝液既能从砂芯内部通过, 砂芯又可为铝液起到保温作用, 如图 2 所示。浇

注工艺设计完成后, 利用 ProCAST 铸造模拟软件对产品毛坯熔体浇注流动场和凝固温度场进行数值模拟<sup>[13-14]</sup>, 分析流动场可以看出, 熔体从浇口进入型腔后, 由下到上快速充型, 铝液充型平稳, 无紊流, 整体流速均匀; 从温度场可以看出, 凝固阶段铸件中心温度较高, 从中心向外壁温度依次递减, 符合铸件凝固顺序, 浇注系统能最大限度地给予铸件热节补缩。结果显示, 采用该浇注系统生产, 流体充型平稳, 无飞溅, 且温度场符合铸件凝固顺序要求, 能够保证产品热节部位得到充分补缩, 不会产生缩松、缩孔缺陷, 如图 3 所示。

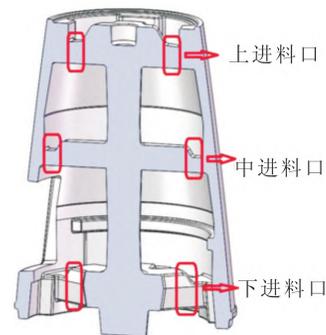


图 2 产品毛坯的浇注系统结构

Fig.2 The structure of the casting system of the product blank

### 1.4 脱模顶杆布局

由于该产品体积大、质量大, 如何顺利地从金属型中取出毛坯, 会直接影响生产的连续性, 因此产品毛坯的顶杆布局和拔模斜度设计极为重要。该产品的金属型模具属于上下左右四开型结构, 在生产过程中首先要打开左右型腔, 再打开上下型腔, 脱模过程需要保证上下型腔打开后, 产品毛坯留在金属型的上模型腔, 再通过顶料机构脱模, 这样就需要给金属型设置合理的拔模斜度, 保证上型腔打开后能将产品毛坯和砂芯带到上型腔不脱落, 然后产品毛坯再平稳地从上型腔脱离。由于产品是回转体结构, 因此设计顶杆布局是对称位置, 如图 4 所示。

针对该产品毛坯和砂芯质量分析, 上型腔需要有足够的包紧力, 才能将毛坯和砂芯带离下型腔, 留在上型腔。下型腔需要尽可能地降低包紧力, 减少铸件开模时的上移阻力, 以确保正常开模脱料。分析产品结构, 上模型腔深度为 61.37 mm, 下模型腔深度为 56.84 mm, 为保证一定的包紧力同时能够平稳脱料, 根据前期试模经验, 若设置拔模斜度为 0, 会造成包紧力太大, 毛坯不能顺利脱模, 需要在一定范围内给予上模型腔必要的拔模斜度, 因此设置上模型腔的拔模斜度为  $0.5^\circ$ , 拔模深度 61.37 mm; 为降低下模型腔包紧力, 同时尽可能减少加工余量, 设置下模型腔的拔模斜度为  $5^\circ$ , 拔模深度 56.84 mm, 降低

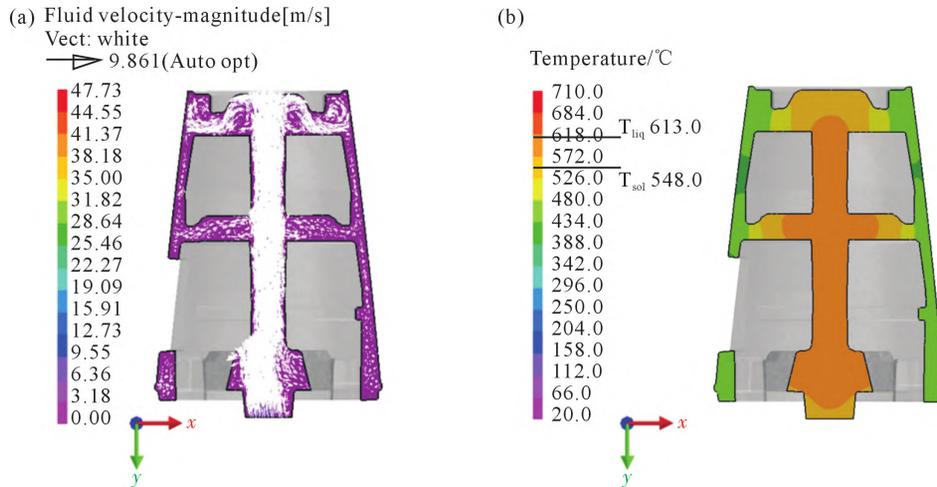


图3 浇注过程:(a)熔体流动场,(b)凝固温度场  
Fig.3 Pouring process: (a) melt flow field, (b) solidification temperature field

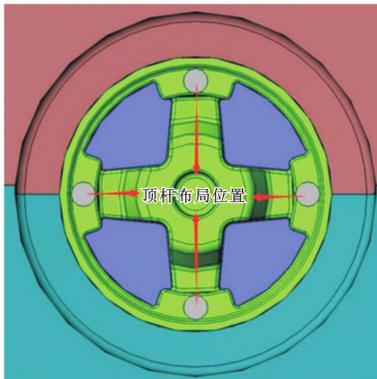


图4 顶杆布局位置  
Fig.4 Ejector layout position

下模包紧力,如图5所示,让产品毛坯开型后留在上模型腔,再通过顶料机构将产品毛坯从上模型腔分离,以达到平稳脱料的目的。



图5 拔模设置  
Fig.5 Draft settings

### 1.5 工艺参数设定

由于产品高度为480 mm,中间浇道为 $\phi 53$  mm,产品毛坯壁厚不均匀,充型时铝液由中间向外圈流动,如何保证铝液充型过程平稳,无紊流,将决定产品毛坯加工后是否合格,因此设置合理的浇注参数是保证产品质量合格的重要环节。通过设置不同的

充型参数进行数值模拟,对比不同充型参数充型时的流动场,观察铝液流动过程的平稳性,最终确定了较为合理的工艺参数。结果显示,铝液温度为700 °C,模具温度320 °C,充型增压速度为0.000 8 MPa·s<sup>-1</sup>时,铝液充型最为平稳。通过数值模拟得到的铝合金舱体最佳低压浇注工艺参数如表1所示。

表1 铝合金舱体低压浇注工艺参数  
Tab.1 Low-pressure pouring process parameters of aluminum alloy cabin

工艺参数	压力 /MPa	增压速度 / (MPa·s <sup>-1</sup> )	时间 /s	铝液温度 /°C
升液	0.020 0	0.002 0	10	
充型	0.036 0	0.000 8	20	
增压	0.060 0	0.002 4	10	700
保压	0.060 0	—	360	
冷却	—	—	260	
出型及下一阶段	—	—	240	

## 2 缺陷及解决措施

### 2.1 缺陷分析

#### 2.1.1 铸件局部疏松

对铝合金舱体进行100%X射线探伤,探伤结果表明,铸件在图6所示部位内部有一定程度的疏松。经分析该处位于产品中腰,壁厚比上部和下部厚,属于产品热节部位,由于该处直径为 $\phi 297.31$  mm,壁厚为24.24 mm,上部壁厚和下部壁厚均为14.27 mm,尺寸相差较大。根据顺序凝固原则,在铸件可能出现疏松的厚大部位通过设置冒口等工艺措施,可使铸件本体先于冒口部位凝固,达到局部补缩的效果。因此数值模拟设计过程中预先在该处中间部位设计“一”字型浇道,充当冒口对其进行补缩。但在实际生产中发现,由于产品中腰处直径较大,远离“一”字型

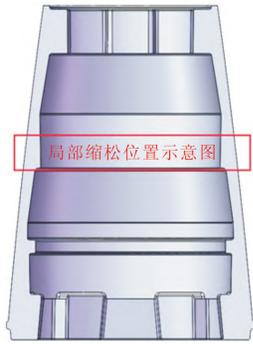


图6 局部缩松位置示意图

Fig.6 Schematic diagram of the location of local shrinkage

浇道内浇口的对称位置存在局部缩松问题<sup>[15]</sup>。

### 2.1.2 铸件内壁加工后出现局部黑皮

铸件热处理后对铸件毛坯进行加工,发现铸件内壁加工后出现局部黑皮,即未能加工见光的部位,而且位置不固定,说明黑皮处产品内径尺寸偏大,部分毛坯尺寸不能满足图纸加工要求,如图7所示。



图7 局部黑皮

Fig.7 Local black skin

### 2.2 解决措施

针对铸件 X 射线探伤结果和加工时存在的问题,解决措施如下:①对于图6所示的局部缩松,将“一”字浇道改为“十”字浇道,如图8所示,增强浇注系统对产品环形热节的补缩,解决该处因补缩不足而导致的缩松缺陷<sup>[16]</sup>。②针对铸件在加工过程中内壁出现不同大小的黑皮现象,分析其主要原因是由于砂芯在合模过程中鼓裂,局部砂芯向外凸出造成铸件内壁缺肉,金属型和砂芯热膨胀系数相差较大,导致金属型模具升温后与砂芯的配合间隙发生变化。为了解决该问题,在金属型加热状态下使用卡尺对型腔进行高温测量,对比测量的砂芯尺寸,发现模具加热后放置砂芯部位的尺寸小于砂芯的高度,造成合模过程中砂芯鼓裂,因此将金属型上型腔尺寸减小1mm,增大上下模之间的合模间隙,确保金属型模具在合型过程中不会将砂芯压裂,如图9所示。

经生产验证,将产品中腰环形热节部位的“一”字浇道改为“十”字浇道,能有效补缩中腰部环形热

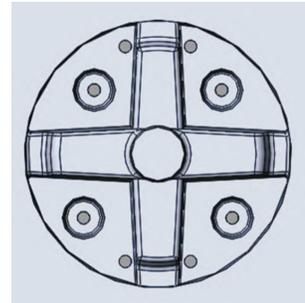


图8 砂芯“十”字浇道

Fig.8 “Cross” sprue of sand core

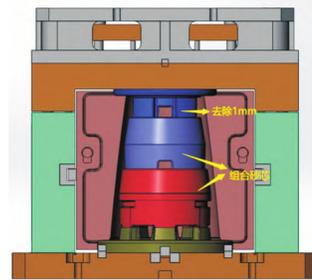


图9 金属型内部结构

Fig.9 Internal structure of metal mold

节凝固过程中的体积收缩,解决腰部热节的缩松缺陷,保证产品内部质量符合要求。同时增大金属型模具热态下和砂芯的配合间隙,可以弥补金属型和砂芯在热态时因收缩比例不同而引起的过盈配合,解决由于金属型模具合模将砂芯压裂造成产品内壁尺寸超差的问题。

## 3 结论

(1)根据产品结构特点,设置上模型腔拔模斜度为 $0.5^\circ$ ,拔模深度为61.37mm,下模型腔的拔模斜度为 $5^\circ$ ,拔模深度为56.84mm,开模时可保证将毛坯和砂芯带到上模通过打料机构实现平稳脱模,确保连续生产。

(2)铝合金舱体低压铸造工艺中,当铝液温度为 $700^\circ\text{C}$ 时,模具温度 $320^\circ\text{C}$ ,设置充型增压速度为 $0.0008\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,铝液充型最为平稳。

(3)在金属模具热态下进行尺寸测量,可真实反映模具与砂芯之间的配合间隙,避免生产时模具热胀、砂芯鼓裂而导致的产品内壁尺寸超差。

### 参考文献:

- [1] 王正科. 铝合金在汽车轻量化中的应用[J]. 时代汽车, 2021(1): 113-114.  
WANG Z K. Application of aluminum alloy in automobile lightweight[J]. Auto Time, 2021(1): 113-114.
- [2] 孙海洋. 铝合金在现代汽车轻量化生产中的应用研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(2): 135-138.  
SUN H Y. Application of light weight automobile and aluminum

- alloy in modern automobile production[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2022, 12(2): 135-138.
- [3] 韦增磊. 浅述铝合金零部件对汽车轻量化的影响 [J]. 中国设备工程, 2022(6): 139-141.  
WEI Z L. The impact of aluminum alloy parts on the weight reduction of automobiles is briefly described[J]. China Plant Engineering, 2022(6): 139-141.
- [4] 樊富友, 于娟, 陈明, 等. 大型薄壁铝合金舱体铸件变形控制及机理研究[J]. 铸造技术, 2013, 34(10): 1336-1339.  
FAN F Y, YU J, CHEN M, et al. Deformation control and mechanism research on large-scale thin-wall cabin body castings of aluminum alloy[J]. Foundry Technology, 2013, 34(10): 1336-1339.
- [5] 孙昌建, 舒大禹, 王元庆, 等. 大型复杂薄壁铝合金铸件真空增压铸造特性研究[J]. 铸造, 2008(5): 442-445.  
SUN C J, SHU D Y, WANG Y Q, et al. Vacuum pressurizing casting technique for large-scale complicated and thin-wall Al-alloy components[J]. Foundry, 2008(5): 442-445.
- [6] 刘翔宇, 苏海青, 黄志国. 基于数值模拟的铝合金舱体差压铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(7): 723-726.  
LIU X Y, SU H Q, HUANG Z G. Optimization of counter-pressure casting process for aluminum alloy cabin body based on numerical simulation[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35(7): 723-726
- [7] 廖可, 舒惠明, 万慧, 等. 低压铸造在大型复杂薄壁结构铝合金铸件的工艺研究[J]. 科技创新与应用, 2017(30): 78-79, 81.  
LIAO K, SHU H M, WAN H, et al. Research on the process of low-pressure casting in large complex thin-walled structure aluminum alloy castings[J]. Technology Innovation and Application, 2017(30): 78-79, 81.
- [8] 翟春泉, 姚真裔, 徐小平, 等. 大型铝铸件砂型低压铸造技术[J]. 铸造技术, 2008(6): 716-720.  
ZHAI C Q, YAO Z Y, XU X P, et al. Low pressure sand mould casting technology for heavy aluminum alloy casting[J]. Foundry Technology, 2008(6): 716-720.
- [9] 刘国庆, 隋大山, 解国宏, 等. 大型铝合金薄壁筒形件低压铸造工艺的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2019, 48(9): 74-78.  
LIU G Q, SUI D S, XIE G H, et al. Numerical simulation of low-pressure casting process for large-sized aluminum alloy thin-wall cylindrical part[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(9): 74-78.
- [10] 赵峰. 大型薄壁铝合金铸件的低压铸造工艺设计[J]. 航天制造技术, 2010(2): 29-31.  
ZHAO F. Process design of large aluminum alloy low-pressure casting with thin wall thickness[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2010(2): 29-31.
- [11] 沈建明. 大型航空薄壁铝合金铸件低压铸造研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.  
SHEN J M. Study of low-pressure casting process on large-sized thin-wall aviation casting part of aluminum alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [12] 郑小秋, 谢世坤, 易荣喜, 等. 低压铸造技术: 发展历程、研究现状和未来趋势[J]. 材料导报, 2016, 30(7): 74-80, 85.  
ZHENG X Q, XIE S K, YI R X, et al. Low-pressure casting: Retrospect, prospect and prospect [J]. Materials Review, 2016, 30(7): 74-80, 85.
- [13] 范李鹏, 姬艳硕, 余国康, 等. 大型铝合金基座铸件数值模拟研究[J]. 铸造技术, 2021, 42(10): 856-860.  
FAN L P, JI Y S, YU G K, et al. Research on numerical simulation of large aluminum alloy base casting[J]. Foundry Technology, 2021, 42(10): 856-860.
- [14] 莫文锋. 基于 ProCAST 汽车铝合金轮毂铸造数值模拟及其优化 [J]. 河南科技, 2022, 41(4): 29-35.  
MO W F. Numerical simulation and optimization of aluminum alloy wheel casting based on ProCAST[J]. Henan Science and Technology, 2022, 41(4): 29-35
- [15] 刘静, 张建平, 王小博. 复杂铝合金铸件铸造工艺优化与设计[J]. 铸造技术, 2020, 41(3): 243-247.  
LIU J, ZHANG J P, WANG X B. Optimization and design of complex aluminum alloy casting process[J]. Foundry Technology, 2020, 41(3): 243-247.
- [16] 孙鹏, 罗平辉. 铝合金导体铸件缺陷分析及工艺改进[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(11): 1261-1262.  
SUN P, LUO P H. Defect analysis and process improvement of Al alloy conductor [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(11): 1261-1262.