

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.07.018

# 某大型复杂圆筒类低压铸造工艺改进

刘 静<sup>1</sup>, 王小博<sup>2</sup>

(1. 航空工业庆安集团有限公司 11 厂, 陕西 西安 710077; 2. 天合东方(西安)安全气囊气体发生器有限公司, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 针对大型航空铝合金铸件的结构特点和性能要求, 在分析采用砂型重力铸造该类铸件时各种铸造缺陷产生原因的基础上, 研究采用低压铸造工艺的可行性, 利用低压铸造工艺的原理和优点, 结合铸造模拟软件解决大型航空铝合金铸件的成型质量问题, 通过铸件结构分析及其铸造原理分析, 进行低压铸造铸型的设计, 利用铸造模拟软件并结合工艺试验, 确定铸件低压铸造生产工艺参数, 解决了铝合金铸件在铸造过程中的气孔、缩松、夹渣等缺陷问题。

**关键词:** 铝硅合金; 低压浇注; 工艺方案; Procast 模拟

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)07-0667-05

## Improvement of Low-pressure Casting Process For a Large Complex Cylindrical Casting

LIU Jing<sup>1</sup>, WANG Xiaobo<sup>2</sup>

(1. Plant 11, Aviation Industry Qingan Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. Trw Dongfang (Xi'an) Airbag Inflator Co., Ltd., Xi'an 710072, China)

**Abstract:** According to the structural characteristics and performance requirements of large-scale aviation aluminum alloy castings, the causes of various casting defects in sand mold gravity casting were analyzed, and the feasibility, principle and advantages of low-pressure casting process were discussed. Through the analysis of casting structure and forming principle, the design of low-pressure casting mold was carried out. The results show that the casting simulation software is used to optimize the casting process, and the process parameters of the low-pressure casting process of large aviation aluminum alloy castings are determined in combination with the process tests. The problems of porosity, shrinkage and slag inclusion are solved to ensure the quality of casting.

**Key words:** aluminum silicon alloy; low pressure casting; the processing plan; procast simulation

铸造铝硅类合金一般指 Si 含量在 4%~13% 的铝合金, 它具有良好的铸造性能; 力学性能、物理性能和切削加工性能<sup>[1-8]</sup>, 是铸造铝合金中品种最多、用量最大、应用最普遍的合金, 被广泛应用于机械工业、电子产品、交通运输、建筑行业。但该类合金在铸造过程中容易吸气氧化, 在铸造过程中经常出现针孔、氧化夹渣、缩松等缺陷, 严重影响铸件质量和外观。本文就某大型复杂类圆筒低压铸造过工艺进行研究。

## 1 铸件的结构特点及性能要求

### 1.1 铸件结构特点

该铸件为圆筒类结构(如图 1), 结构复杂, 最大尺寸为 672 mm×φ417 mm, 铸件壁厚不均匀, 最薄



图 1 铸件结构

Fig.1 The casting structure

处与最厚处壁厚差异为 54 mm, 需多个砂芯组合造型, 且均存在大平板结构, 铸造工艺性差, 易产生夹渣、气孔、缩松等铸造缺陷。

### 1.2 质量要求

该铸件材料为 ZL104/HB962-86, 属中大型铝合金砂型铸件, 铸件要求 100%X 射线和荧光检查, 不允许有缩松和裂纹, 铸件尺寸公差要求为 HB6103-86 之 CT11 级。

收稿日期: 2019-11-22

作者简介: 刘 静(1984-), 女, 陕西西安人, 工程师。主要从事铸造工艺方面的工作。电话: 15929319671,

E-mail: fmg1527@163.com

## 2 工艺方案分析

### 2.1 重力浇注工艺问题分析

铸件采用阶梯式浇注方式,在铸件高度方向上开设若干内浇道,使熔融金属从底部开始,逐层地从若干不同高度引入型腔的浇注系统,结构如图 2。

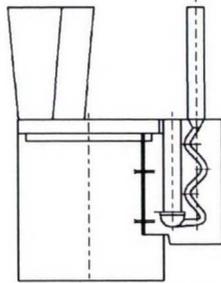


图 2 重力铸造方案  
Fig.2 Gravity casting scheme

因铝硅合金的自身特点及该铸件的壁厚差异,铸造工艺性差,易产生夹渣、气孔、缩松等铸造缺陷(如图 3 和图 4),在采用重力浇注工艺的情况下尽管管放了很多冷铁、冒口,但废品率仍然很高。

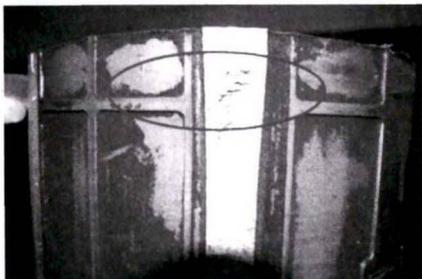


图 3 缩松缺陷  
Fig.3 Shrinkage defects

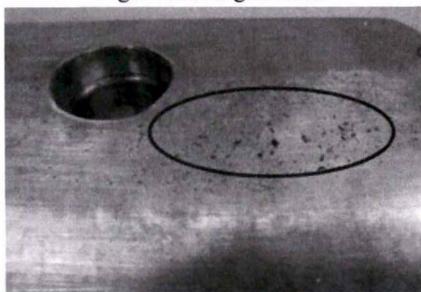


图 4 夹渣缺陷  
Fig.4 Slag inclusion defects

### 2.2 反重力工艺分析

目前国内外在浇注大型高质量铸件时,一般都采用低压浇注的方法<sup>[9]</sup>,低压浇注时金属液可平稳充入铸型,能在铸型中形成一个下高上低的合理的凝固温度梯度,同时铸件在压力下结晶,有利于得到组织致密的铸件,提高铸件力学性能。另外低压铸造速度可以根据实际需要进行控制,减少重力浇注时金属液倾倒入冲击飞溅现象,以及在充型过程中由于紊流而引起的吸气、卷起及合金液的二次氧

化,因而可减少铸件产生夹杂、气孔缺陷的几率<sup>[10]</sup>。

#### 2.2.1 工艺难点分析

圆筒铸件主要研制难点包括:结构复杂且含半封闭空腔结构,成形较为困难;铸件热节分散且相互干涉,指定区域热节厚大且内部质量要求严格,因此,要获得组织致密、性能优良的该合金铸件,工艺上应采取如下措施<sup>[11]</sup>。

(1)强制激冷 让铸件厚大处先凝固。圆筒类铸件下部及内腔的厚大部分,都很难得到金属液的补缩,凝固时间比较长,晶粒粗大容易出现疏松等缺陷。为了确保厚大部位组织致密,在铸型底部和内腔采用强制激冷的方法,让厚大部位先冷却凝固,这样可以有效地减小铸件因壁厚不同而带来的凝固时间的差别,造成从上到下的顺序凝固。

(2)建立温度梯度 实现顺序凝固加强铸件底部激冷和侧向等处的激冷,扩大垂直方向上的温度差,创造合理的顺序凝固条件,强化顺序凝固趋势,保证自上而下的顺序凝固。同时适当增大增高冒口,在热量分布上创造有利于顺序凝固的温度场。

(3)铸件的浇注系统 采用开放式浇注系统,用底注式和缝隙式相结合的浇注系统将金属液引入型腔,保证合金液平稳快速充型,也有利于形成良好的顺序凝固条件。

#### 2.2.2 浇注系统设计

浇注系统采用缝隙立筒式浇注系统。立筒缝隙的数量经验公式如下<sup>[11]</sup>:

$$n=(0.016\sim 0.028)S/\delta \quad (1)$$

$$a=(0.8\sim 1.5)\delta \text{ 铸件} \quad (2)$$

$$b=1/2d+(15\sim 35)\text{mm} \quad (3)$$

$$D=(4\sim 6)a \quad (4)$$

式中, $n$  为立筒数量; $S$  为铸件外形周长; $a$  为缝隙厚度; $b$  为缝隙宽度; $D$  为立筒直径。

事实上,立筒数量还取决于单个立筒和缝隙内浇道所能控制的充型范围和补缩范围以及铸件的壁厚, $n$  值和铸造方法及浇注方法有关。根据铸件的结构特点,设计了如图 5 的浇注系统。采用 5 个缝隙式内浇道浇注铸件,间距约 240~300 mm 缝隙式内浇道即可引流,也可对铸件进行补缩。

因为采用低压浇注机浇注时升液管是始终埋在铝液液面以下的,经由浇注系统进入型腔的氧化皮或夹渣都非常少,所以在设计浇注系统时更多的考虑补缩和充型平稳,而不需要过多的考虑浇注系统的挡渣作用。采用对称式浇注形式,这也使零件的内应力分布比较均匀,降低变形量。在芯盒中刻出定位槽,对补缩立柱进行准确定位,严格控制其补缩距

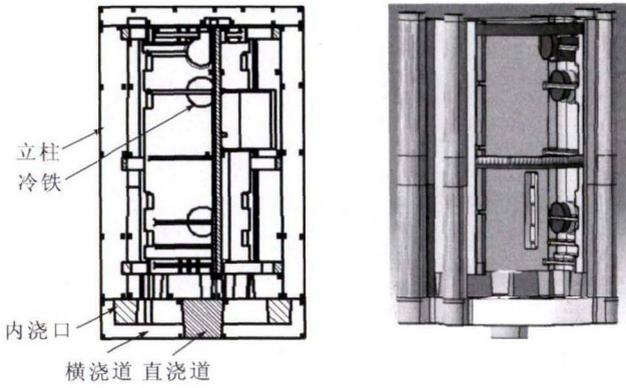


图 5 铸件工艺简图  
Fig.5 Casting process diagram

离, 并保证其正对铸件侧壁和隔板连接处形成的热节。

2.2.3 工艺参数确定

低压铸造主要参数包括升液速度、充型速度、结壳增压速度、结壳增压压力、结晶时间、浇注温度等。压力曲线见图 6。

根据实际情况该铸件设置的升液速度为 1.0kPa/s、充型速度为 0.8 kPa/s、增压压力为 2 kPa、结壳保压时间为 10 s、增压速度为 1.5 kPa/s、浇注温度为 710±10 °C、增压速度为 0.4 kPa/s、结晶增压压力为 15 kPa, 结晶时间 400 s。

2.2.4 工艺模拟

工艺参数确定后, 采用 ProCAST 2013 进行模拟计算, 计算结果图 7、图 8。在充型过程中, 各阶段充型分布  $t=25$  s 时, 金属液由升液管通过横浇道进

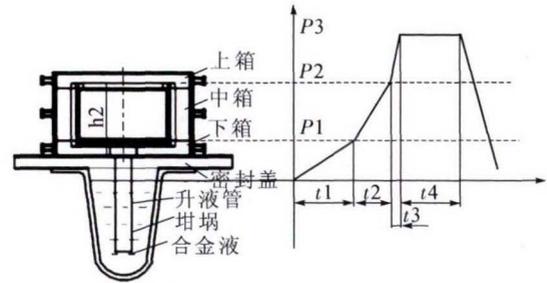


图 6 低压浇注充型工艺过程压力曲线  
Fig.6 Pressure curve of low pressure mold filling process

入内浇道, 如图 7(a);  $t=45$  s 时, 金属液由内浇道均匀充填型腔, 液面平稳上升, 如图 7(b);  $t=60$  s 时, 金属液完全充满型腔, 充型过程结束如图 7(c)。

由模拟过程不同时间段充型结果可知, 金属液在压力作用下由型腔底部逐层向上顺序充填铸型型腔, 整个充型过程平稳, 没有明显的液相起伏、飞溅, 因此浇注系统和充型工艺参数的选取是合理的。

基于以上模拟结果的分析, 在缩孔、缩松的分布图 8 中, 铸件中没有缩孔、缩松的缺陷, 而缩孔、缩松的缺陷分布在浇注系统上, 对于铸件没有影响, 所以该浇注系统和工艺参数的设置是合理的, 可以满足生产的要求, 可以进行生产验证。

3 工艺方案试制

3.1 第 1 次试制

按照确定好的工艺参数进行生产, 浇注后铸件经过 X 射线和荧光检验, 其内部和表面质量均符合



图 7 铸件充型情况及其温度分布  
Fig.7 Casting filling condition and temperature distribution

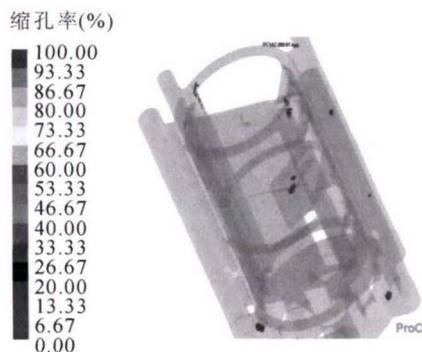


图 8 缩孔、缩松的分布图(图中有颜色的点)  
Fig.8 Distribution of shrinkage cavity and porosity (colored points)

HB963-90 II类铸件质量要求。但其表面质量较为粗糙,如图 9。分析原因主要是有以下 3 种可能:①由于设置浇注参数中结壳增压速度过大造成;②由于结壳时间设定较短或者结晶增压速度过大所致。结壳时间短,液态金属表面未形成表层壳体,此时如果结晶增压速度过快,液态金属会在压力作用下刺穿原来已经形成的金属外壳,渗入砂粒之间的间隙,凝固后铸件表面会形成肉眼可见的凹凸毛刺状现象。根据以上原因分析,我们决定适当调整结壳

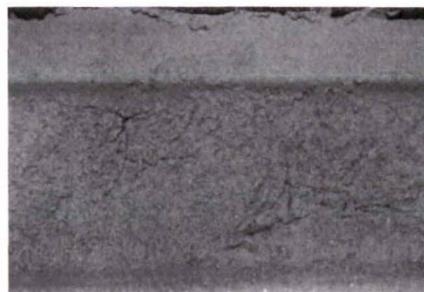


图 9 铸件表面质量  
Fig.9 Casting surface quality

时间和结晶增压速度,进行第二次试制。

### 3.2 第 2 次试制

调整好工艺参数后重新进行方案验证,发现铸件表面有冷隔,顶端存在比较严重的披缝和气孔缺陷,浇注过程存在跑火安全隐患,铸件缺陷如图 10。虽然铸件表面质量有所改善,但仍未达到预期要求的状态。经过对铸件缺陷的讨论分析,我们认为本次铸件顶端出现的冷隔缺陷可能是由于升液管预热不充分导致的,属于偶发问题,表面粗糙是由于结壳增压速度、结壳时间、结晶增压速度、结晶压力过大所致。



图 10 铸件气孔缺陷  
Fig.10 Casting porosity defect

### 3.3 第 3 次试制

将结晶增压压力分别由原来的 4.5 kPa/s, 4 s, 10 kPa/s 调整到 2.5 kPa/s, 25 s, 15 kPa/s 再次进行试验。

经过 X 射线检查,铸件内部质量符合 HB963-90 II类铸件的要求。荧光检验没有发现表面线性裂纹及穿透性缩松等缺陷。升液管口部有少量堵塞,约在 50~70 mm,按照相关专业资料介绍,升液管堵塞长度在 20~50 mm 长度为最佳状态,我们再次将结晶保压时间下调至 350 s 进行了试制。结果,升液管口部堵塞完全消除。

## 4 生产验证

通过严格控制操作规程,完善工艺规范,成功实现了该铸件的批量生产,产品质量达到各项检验标准要求如图 11。

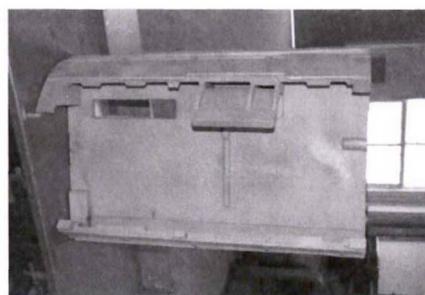


图 11 改进工艺后生产的铸件  
Fig.11 Castings produced after improved process

## 5 结论

- (1)在铝合金砂型低压铸造实验浇注中,砂型采用的是树脂自硬砂,其透气性好,在其型腔内部表面涂上涂料,则其获得的铸件表面质量好。
- (2)经过实验浇注可以证明,低压铸造获得的铸

件成形性好,有利于形成轮廓清晰、表面光洁的铸件。

(3)低压铸造中,液体金属充型比较平稳,提高了其补缩能力,一般情况下不需要使用冒口,而且解决了重力铸造中充型平稳性与补缩的矛盾,而且使铸件品质大大提高。

(4)在低压铸造试验浇注中,浇注工艺参数的选择,对于铸件的成型和质量有着非常重要的影响。

(5)用 Procsat 软件进行数值模拟,可以使设计人员不需要进行实际浇注的情况下,获得最优方案,提高工作效率。

#### 参考文献:

- [1] 北京航空材料研究院. ZL205 高强度铸造铝合金的研究 [D]. 北京:北京航空材料研究院,1977.
- [2] 北京航空材料研究所编. 航空材料学[M]. 上海:上海科学技术

- 出版社,1985.
- [3] 中国航空材料手册编委会. 中国航空材料手册第3卷: 铝合金镁合金[M]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [4] 田荣璋. 铸造铝合金[M]. 长沙:中南大学出版社,2006.
- [5] 中国机械工程学会铸造分会编. 铸造手册第3卷: 铸造非铁合金[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [6] 龚磊清,金长庚,刘发信,等. 铸造铝合金相图谱[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1987.
- [7] 《有色金属及其热处理》编写组编. 有色金属及其热处理[M]. 北京:国防工业出版社,1981.
- [8] 陆树荪,顾开道,郑来苏. 有色铸造合金及熔炼[M]. 北京:国防工业出版社,1983.
- [9] 童胜坤,尚淑珍,孙秀云,等. 低压铸造 A356.2 铝合金轮毂轮辐的性能[J]. 特种铸造及有色合金,2012,32(11):1030-1033.
- [10] 聂小武. 实用有色金属铸造技术[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,2009.
- [11] 熊艳才,刘伯操. 铸造铝合金现状及未来发展[J]. 特种铸造及有色合金,1998(4):1-5.

## 消失模铸造专家刘立中“坐堂”

### ——《铸造技术》杂志开辟“消失模铸造专栏”告读者

刘立中先生,通过自主研发出独具特色的消失模铸造设备,并成功生产出精美铸件,自成体系。获得 30 多项国家发明专利,成为国内最早一批投身消失模铸造的专家,著有《消失模铸造工艺学》一书(2019年5月20日化工出版社出版),系其亲身经历 30 多年现场实践经验的总结和理论的升华。被叶升平教授称作国内“消失模铸造第一人”。

《消失模铸造工艺学》提出的“消失模铸造流场、热场、负压场三场理论”、“消失模铸造浇注系统直浇道细,横浇道粗,内浇道短的设计原则”、“借用型腔做浇道,极致简化浇注系统”的新理论,均属首创。为验证和推广这些新理论,自 2000 年起,先后举办 14 届刘立中先生主讲的“消失模铸造专题讲座”,反响热烈。业界知名专家——魏兵教授对此书评价,认为“每一项技术和观点都是从实践中来,又应用到实践中去,反复验证,不断完善,属完全的创新成果”。国内多家铸造企业应用“三场理论”取得了明显提高铸件合格率、明显提高金属液利用率、明显提高员工劳动效率,进而提高铸造企业经济效益的成果。

“消失模铸造三场理论”、特别是“借用型腔做浇道,极致简化浇注系统”解决了困扰消失模铸造的泡沫模型导致的缺陷,打开了消失模铸造工艺通向铸钢件,特别是低碳钢和不锈钢铸件的大门,也打开了对消失模铸造的理解还处于混沌状态的企业通往成功之路的大门。毫不夸张地讲,挽救了多家处于倒闭边缘的消失模铸造厂。

2019年6月,应《铸造技术》杂志邀请,与刘立中先生联手,《铸造技术》杂志开辟“消失模铸造专栏”,从专家的角度,“坐堂”解难答疑,回应业界同仁有关消失模铸造理论与实践各方面的咨询。

此举,势必为推动中国铸造业发展、尤其是消失模铸造技术的进步做出独特之贡献。欢迎业界同仁参与。