

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2020.03.010

复杂铝合金铸件铸造工艺优化与设计

刘 静¹, 张建平¹, 王小博²

(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: 针对大型航空薄壁铝合金铸件的结构特点和性能要求, 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问题。通过铸件结构及铸造原理分析, 进行低压铸造铸型的设计。结果表明, 利用铸造模拟软件, 结合工艺试验对铸型设计、浇注工艺进行了验证, 确定了铸件的低压铸造产生工艺和过程参数, 解决了大型航空铝合金铸件的气孔、缩松、裂纹等缺陷问题。

关键词: ZL205A; 低压浇注; 裂纹; 缩松

中图分类号: TG243

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)03-0243-05

Optimization and Design of Complex Aluminum Alloy Casting Process

LIU Jing¹, ZHANG Jianping¹, WANG Xiaobo²

(1. Qingan Group Co., Ltd., Branch11, Xi'an 710077, China; 2. Tanhe Dongfang (Xi'an) Airbag Inflator Co., Ltd., Xi'an 710072, China)

Abstract: In view of the structural characteristics and performance requirements of large aviation thin wall aluminum alloy castings, the principle and advantages of low pressure casting process were utilized to solve the casting process problem of large aviation aluminum alloy castings by means of casting simulation software. Through the analysis of casting structure and casting principle, the design of low pressure casting mold was carried out. The results show that the casting mold design and casting process are verified by using casting simulation software and process test, and the production process and process parameters of low-pressure casting are determined.

Key words: ZL205A alloy; low pressure casting; crack; shrinkage porosity

某骨架铸件要求100% X射线检查, 属中大型铝合金砂型铸件, 尺寸公差CT11级, 材料为ZL205A/HB962-86, 该合金已多次用于铸件, 熔炼工艺上成熟。其结构复杂, 壁厚差异大, 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、裂纹等铸造缺陷。自树脂砂线建成起铸件都以该方式生产, 表面质量一直不稳定, 废品率很高, 其中最主要的缺陷就是铸件表面产生裂纹(荧光检测下), 特别是铸件的热节部位, 热裂倾向性更大, 约占表面热裂缺陷的69%, 缩松缺陷占100%, 导致铸件大批量报废, 造成巨大经济损失。

1 基本技术要求

1.1 铸件结构

该铸件结构如图1, 其轮廓尺寸为1 387 mm×90 mm×296 mm, 两侧壁厚为8~15 mm, 内腔有两

处130 mm×90 mm×42 mm的厚大结构。铸件上表面开口较多, 由于骨架内腔纵横隔筋的存在, 铸件在纵横筋及隔板交错处热节较多, 在两处上挂点部位有非常巨大的热节点存在, 其余部位的壁厚也不尽相同, 存在有小的热节, 要实现铸件同时凝固或顺序凝固难度比较大。

1.2 技术要求

该铸件属飞机发射装置部件, 工作环境恶劣, 受力情况复杂, 要求组织致密, 不允许出现气孔、缩松等铸造缺陷。所用材料ZL205A属于高强度铸造铝合金, 有较好的强度和机加性能, 结晶温度范围较宽, 达到近90 °C, 铸造性能较差, 热裂倾向较大, 易产生疏松、偏析等铸造缺陷。须增强激冷和补缩, 形成有利的顺序凝固条件, 以保证获得组织致密的优质铸件, 充分发挥材料的高强度特性^[1]。

2 工艺方案设计

2.1 工艺方法

目前国内外在浇注大型高质量铸件时, 多采用低压浇注的方法, 金属液可平稳充入铸型, 形成一个下高上低合理的凝固温度梯度, 同时铸件在压力下

收稿日期: 2019-11-26

作者简介: 刘 静(1984-), 女, 陕西西安人, 工程师。主要从事铸造工艺设计与研究方面的工作。电话: 15929319671, E-mail: fmg1527@163.com

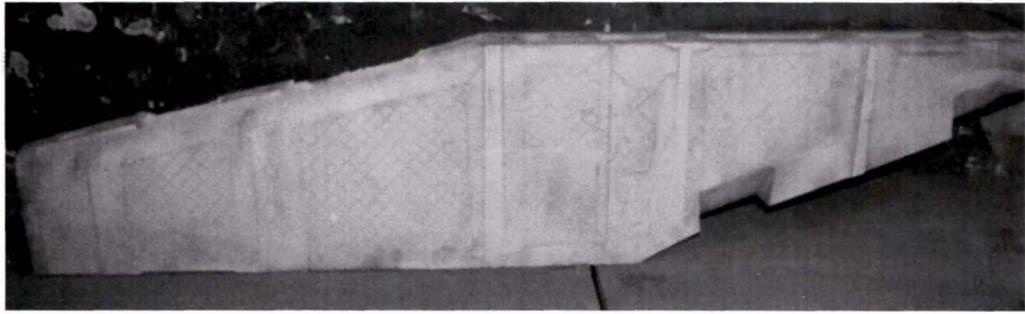


图1 铸件结构简图
Fig.1 The casting structure

结晶,有利于得到组织致密的铸件,提高力学性能。且可根据实际需要控制,减少重力浇注时金属液倾倒入时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,因而减少铸件产生夹杂、气孔缺陷的几率^[2]。

2.2 浇注系统

骨架为长条形,根据结构及方法特点采用缝隙式浇注,设置多个内浇道并在骨架的两侧设置多个横浇道,内浇道和升液管口连通起来,液体金属自升液管进入型腔后,通过横浇道分流至各个内浇道充填型腔。

2.2.1 位置确定

铸件浇注位置不同,冶金质量和铸造工艺难易程度也不同,经过对水平和垂直浇注位置的综合分析,垂直浇注位置有以下优点。

(1)可在铸件两侧设置缝隙立筒浇注系统,使热量平衡分布,有利于铝液充填铸型、顺序凝固,排气和浮渣。

(2)有利于在型芯上采用激冷砂和冷铁等综合激冷措施,调节铸件局部厚大部位的冷却速度,获得致密的铸态组织。

(3)有利于制作整体型芯,确保铸件尺寸的精度。

(4)有利于造型、下芯与合箱。

2.2.2 隙缝式浇注系统的设计

低压铸造所采用的隙缝式浇注系统,其组成单元有直浇道、横浇道、内浇道和隙缝浇道等,也可看成是一种特殊的底注式浇注系统。通常隙缝浇道的参数可以按如下的共识确定。

(1)全部隙缝的总厚度(Σam)

$$\Sigma am = (0.008 - 0.012) P_{\phi} \quad (1)$$

式中, P_{ϕ} 铸型型腔截面的周边全长

(2)一个缝的厚度 a 按下式计算

$$a \leq (0.7 - 1.0) \delta, \text{ 当 } \delta \geq 10 \text{ mm} \quad (2)$$

$$a = (1.0 - 1.5) \delta, \text{ 当 } \delta \leq 10 \text{ mm} \quad (3)$$

式中, δ 隙缝浇道处铸件壁厚

(3)隙缝的数目 n

$$n = \Sigma am / a \quad (4)$$

(4)隙缝的长度 b (从铸件到立筒的距离) 和立筒的直径 D

$$b = D \geq 4a \quad (5)$$

也可以根据具体情况而定,通常取 15~35 mm;

设计了图2所示的浇注系统。采用19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。 a 选择为 1.2δ 铸件, D 取值为 $4a$,立筒采用上大下小布局,斜度为 1.2° 。

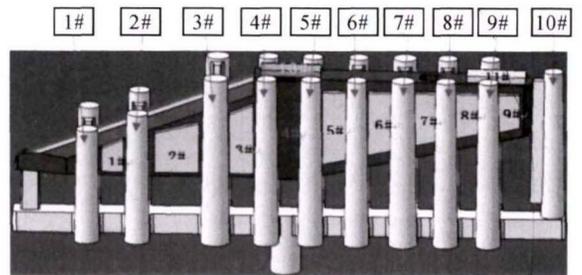


图2 原工艺方案
Fig.2 Original process plan

2.3 参数的选择

主要包括升液速度、充型速度、结壳增压速度、结壳增压压力、结壳时间、结晶增压速度、结晶增压压力、结晶时间、浇注温度等。压力曲线见图3。

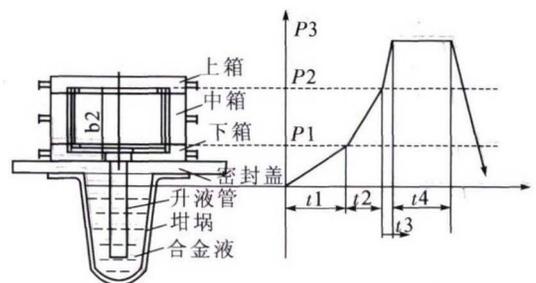


图3 低压浇注充型工艺过程压力曲线
Fig.3 Pressure curve of low pressure mold filling process

(1)升液速度 金属液在升液管中的上升速度为升液速度,原则是:金属液上升时能够顺利排气、撇渣,不造成金属液在浇口产生喷射,并使其易排出型外,根据实际情况该铸件设置的升液速度为

1.0 kPa/s。

(2)充型压力和充型速度 金属液在铸型中上升的快慢程度为充型速度。传统自由浇注无法控制和调整充型速度,因而难以有效避免紊流和氧化夹渣卷入。低压铸造具有自上而下逆重力方向平稳充型的特点,可以通过控制气体正压速率调整充型速度。当铸件高度确定后,就可以根据下式来计算充型压力值:

$$P_{充}=H \times \gamma \times \mu \times 133.3 / 13.6 \quad (6)$$

式中, $P_{充}$ 为充型压力,Pa; H 为合金液从液面上升到铸件顶部的总高度,cm; γ 为合金液比重。

本文充型速度为0.8 kPa/s。

(3)结壳增压压力 增压压力就是金属液充满型腔以后为了防止铸件出现缩孔、缩松等缺陷,迅速地使用坩埚内的压力达到铸件的保压压力,而使金属液向铸件的正在凝固的金属及时补缩凝固。本文增压压力为2 kPa。

(4)结壳保压时间 该参数取值太小,会使铸件表面结壳太薄,后续增压过程中壳层容易破裂,造成铸件表面质量差;取值太大,会使铸件表面结壳太厚,在铸件处于糊状凝固阶段,影响凝固补缩,导致铸件缩松。本文结壳保压时间为10 s。

(5)结晶增压速度 该参数的取值与结壳增压速度相同。对于薄壁铸件和金属型铸件,由于凝固速度快,增压速度可选择高些;对于砂型或厚壁铸件,增压速度可选择低些。本文增压速度为1.5 kPa/s。

(6)浇注温度 选择原则是:在保证铸件成形的前提下尽可能低一点。重力铸造熔炼ZL205A时采用的浇注温度是 725 ± 10 °C,低压铸造是在密封下进行的,金属液的温度在充型的过程中降低较少,金属液的充型性也较好,低压铸造时可降低 $10 \sim 20$ °C,本文浇注温度为 710 ± 10 °C。

(7)其它参数 本文增压速度为0.4 kPa/s,结晶增压压力为15 kPa,结晶时间400 s。

3 骨架铸件缺陷类型及产生机理

铸件因线性缺陷报废的铸件占69%,缩松缺陷100%,降低该骨架的线性显示发生率及缩松是急于解决的问题。

3.1 缩松缺陷产生的机理

浇入铸型中的液态合金,在冷却和凝固过程中,若合金液态收缩和凝固收缩大于固态收缩,所减小的体积得不到外来金属液的补充,则在铸件上最后凝固的部位形成一些集中或分散的孔洞,其中

容积较大的孔洞叫缩孔,细小且分散的孔洞叫缩松^[3]。

3.2 裂纹缺陷产生的机理

热裂纹的形成是由于铸件在凝固末期晶间存放在液膜和铸件凝固过程中受到的拉力共同作用的结果。液膜是产生热裂纹的根本原因,而铸件收缩受阻是产生热裂纹的必要条件,但单纯由液膜理论解释热裂的形成具有其局限性^[4]。

4 工艺模拟结果

4.1 有限元模型的建立

采用CATIA软件绘制铸件工艺方案的三维图,导入Visual-Cast 8.6后,设置网格大小,并利用Visual-Cast 8.6的Visual mesh划分网格,划分后见图5。

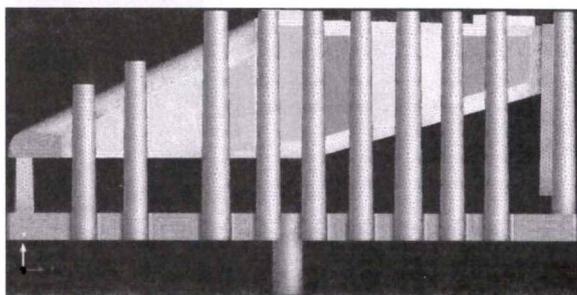


图4 原工艺方案有限元模型

Fig.4 Finite element model of the original casting process plan

4.2 模拟结果分析

采用ProCAST 2013进行模拟计算,计算结果如图5、图6、图7。

由图6看出,在凝固过程中,A区域温度高于其他位置,在温度场中为温度最高的地方,为热节点,易发生缩松、缩孔缺陷。A'区域在整个凝固过程中,均是最后凝固部位,形成了孤立的液相区域,此处的金属液经液态收缩、凝固收缩和固态收缩,体积收缩逐渐加大而该处由于无法得到补缩而形成细小或分散的孔洞,即缩孔、缩松缺陷。

骨架存在缩松趋势,在凝固后期,固相骨架已经形成了并开始线收缩,由于收缩受阻,产生应力的强度和应变。当应力或变形超过合金在该温度下极限或变形能力时,铸件边产生热裂纹。图7,在生产中发现除了A、B处有缺陷,C处也存在缺陷,但在模拟结果中并未体现。经分析,C处因壁厚较厚,金属液进料时都由该处充型,导致该处过热,形成缺陷。

5 改进工艺方案

5.1 改进后的工艺方案

造成骨架铸件产生缩松缺陷的主要原因是由于B处周围全部凝固完毕,而B处局部为最后凝固部位,A处是因为隙缝的补缩距离是有限的,2#、3#隙

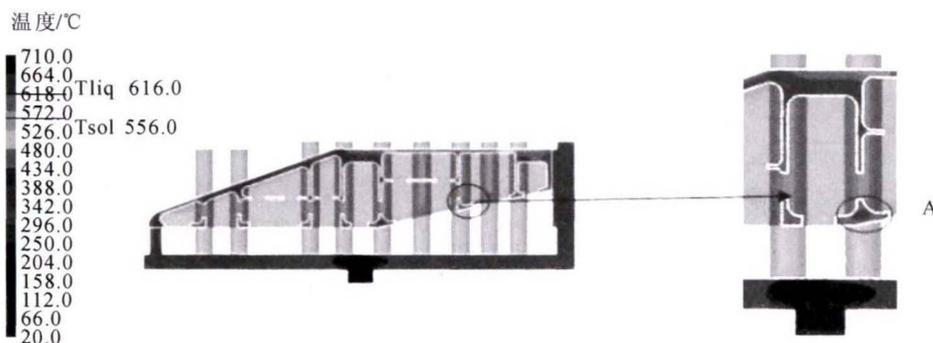


图 5 原工艺方案温度场
Fig.5 Original process scheme temperature field

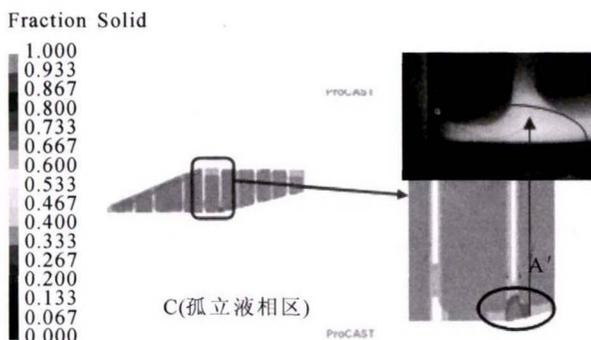


图 6 原工艺方案铸件固相率
Fig.6 Original casting process plan solid fraction

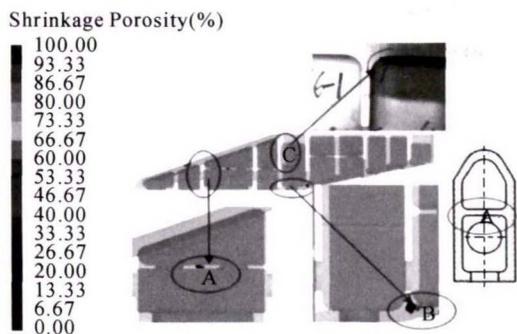


图 7 原工艺方案铸件缺陷预测图
Fig.7 Casting defect prediction diagram of original casting process plan

缝之间的距离过长,补缩源无法进行补缩,铸件在凝固后期,固相骨架已经形成了并开始收缩,由于收缩受阻,铸件中产生应力的强度和应变。当应力或变形超过合金在该温度下极限或变形能力时,铸件边产生热裂纹。C处缺陷是因为竖筋两侧壁厚差异太大,浇注时金属液不断从4#缝隙进入,导致该处过热,结合工艺方案分析,认为A处是因为没有补缩源对其进行补缩,因此在2#、3#隙缝之间增加12#隙缝进行补缩,取消3#、4#缝隙,同时在B处增加冷铁,增加该处的凝固速率,改进后的方案如图8所示。

5.2 模拟结果分析

图9所示为骨架铸件改进工艺方案凝固过程中温度场的变化情况,从图中可以看出,在凝固过

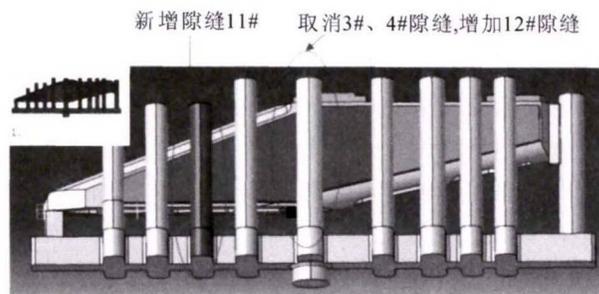


图 8 改进后的工艺方案
Fig.8 Improved casting process plan

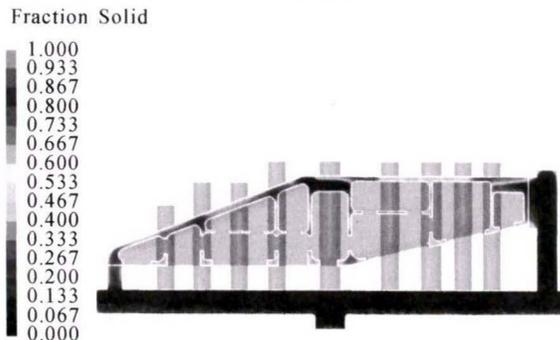


图 9 改进后方案模拟
Fig.9 Simulation results of improved scheme

程中,C处局部区域温度高于其他位置,在温度场中为温度最高的地方,为热节点,易发生缩松、缩孔缺陷。

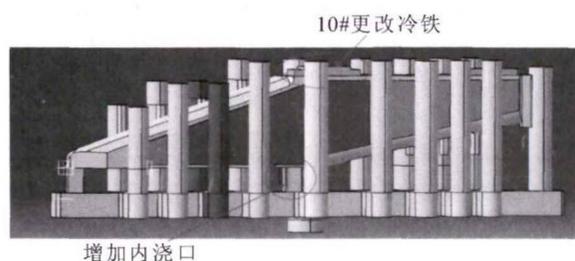
5.3 试验结果

按改进后工艺方案生产铸件4件,经初检及X射线检查仍然存在缺陷,经工艺模拟及头脑风暴分析,图8中A处的缺陷是因为取消3#、4#缝隙后无补缩源,且该处壁厚较厚形成热节,故产生缺陷;B处由于铸件侧壁结构及壁厚限制,整体壁厚较薄,且局部壁厚交叉连接位置有热节,造成了竖筋最后凝固,得不到有效补缩,特别是侧壁与竖筋连接的位置,凝固顺序紊乱,最终在竖筋位置B、C'处存在缩松缺陷,与模拟结果基本一致。

5.4 工艺方案的优化

在改进工艺方案的基础上进行优化,对图8中A

处的热节增加2个内浇道进行补缩,同时更改10#冷铁的形状与尺寸,增强铸件上端的快速激冷,具体方案见图10。



增加内浇口

图 10 优化的工艺方案

Fig.10 Optimized casting process plan

5.5 优化方案模拟结果

通过对优化方案进行仿真模拟分析,在铸件底部增加了内浇道,可直接通过相应的浇道进行填充,充型平稳且凝固顺序良好,缝隙浇道及冒口起到很好的补缩作用,有效避免了二次氧化夹渣、裂纹和缩孔缩松类凝固缺陷^[5]。

5.6 试验验证

按优化后的工艺方案试生产铸件8件,通过X射线及荧光检测,除1件有气孔外,其余7件铸件内部质量良好,无缺陷。

6 结论

在项目实施后共生产了20件铸件,经荧光检测发现只有1件有线性缺陷,其它都符合设计要求,铸件质量较高、交付渠道顺畅,大量减少了工作量,改善效果显著。

利用ProCAST中的低压铸造模拟模块,对大型铝合金骨架类铸件的低压铸造过程流场温度场进行了数值模拟和分析,结合模拟结果对其铸造工艺方案进行优化,以实现平稳充型,合理的凝固顺序以及凝固应力场控制,并最终浇注获得合格铸件。

(1)铸件中存在多处大平面结构,且壁厚差异较大,采用底注式浇注位置,能够使铸件在充型过程中避免平面位置氧化夹渣的卷入,且隙缝式浇注系统能够进一步保证铸件充型平稳。

(2)铸件结构复杂且薄厚差异较大,难以依靠冷铁和补贴实现严格的自上而下凝固,利用隙缝式浇注系统同时补缩,能够保证铸件合理的凝固顺序,消除凝固缺陷。

(3)铸件内部横板凝固时间短,线收缩力大,横筋两端与铸件侧壁连接位置收缩受到铸型阻碍,形成裂纹,此裂纹缺陷为典型热裂。通过增加补缩通道,调整薄壁筋板凝固速率和应力集中作用范围,能够将最大热应力降低,避免热裂产生。

参考文献:

- [1] 北京航空材料研究院. ZL205A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] 田荣璋. 铸造铝合金[M]. 长沙:中南大学出版社,2006.
- [3] 《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.
- [4] 陆树芬,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.
- [5] 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.

技术资料邮购

《铸造抗磨产品实用生产技术集》

《铸造抗磨产品实用生产技术集》本书由李德臣教授级高工编著。共8章: 1、关于锰钢生产技术; 2、球墨铸铁与蠕墨铸铁生产技术; 3、抗磨产品生产技术; 4、锤头生产技术; 5、消失模、V法生产技术; 6、典型铸件的生产技术; 7、还原罐生产技术; 8、关于企业管理。全书22万字。特快专递邮购价: 98元。

邮购咨询: 李巧凤 电话/传真: 029-83222071