

大型 ZL205A 铝合金舱体铸件 铸造工艺研究

杜旭初^{1, 2}, 黄粒^{1, 2}, 厉沙沙^{1, 2}, 何茂领^{1, 2}, 郝慧林^{1, 2}

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心, 北京 100095)

摘要: 以ZL205A厚大舱体铸件为研究对象, 针对舱体铸件的特点, 开展了铸造工艺方案设计、铸造工艺方案数值仿真计算及熔体处理等技术的研究。研究结果表明: 铸件采用差压浇注方法, 低热量浇注系统, 配合低热量浇注系统使用的冷铁, 铸件实现了顺序凝固; 铸件经检测, 内部质量优良, 切取试样力学性能远超过了指标值, 各项指标均满足设计要求。

关键词: 铝合金舱体; 工艺设计; 缝隙式浇道优化

随着铝合金铸件的广泛应用, 航空、航天、电子等军工工业市场对铝合金铸件的品质要求越来越高, 除了要求其具有高的强度和韧性, 还对铸件的重量、尺寸精度提出了越来越高的要求。如何保证大尺寸铝合金铸件的品质, 突破传统铝合金铸件的生产工艺, 已成为影响铝合金铸件在军工行业市场前景的关键因素, 这是铸造技术人员亟待解决的问题。

差压铸造是金属液在压差作用下充填到预先有一定压力的型腔内, 进行结晶凝固, 获得零件毛坯的一种工艺, 具体是将铸型和坩埚分别置于主体部分的上下两个互相隔绝又可相互连通的密闭压力罐内, 经密封后, 在上下罐体内通入预定压力的干燥气体介质, 达到平衡后, 采用一定的方法使下罐的压力比上罐的压力高, 金属液在压力的作用下, 自下而上充型, 铸型充满后保压, 铸件在高的压力下结晶凝固; 最后解除压力, 使剩余的金属液流回坩埚。差压铸造设备的工作压力为0.6 MPa, 压差范围为50 kPa左右^[1]。由于铸件在很高的压力环境下凝固(补缩能力是低压铸造的4~5倍), 可减少铸件的气孔、氢针孔、缩孔等缺陷, 能获得致密组织和较高的力学性能。差压铸造对于提高铸件组织致密和本体力学性能方面具有更大优势, 随着航天产品要求的提高, 差压铸造已越来越多地被采用。

某大型铝合金舱体铸件为某型导弹的关键承力结构件, 铸件是仪器舱与设备舱的关键连接部分, 除对铸件力学性能有要求外, 对铸件的内部质量也提出较高要求, 采用现有浇注系统及铸造工艺来调控铸态微观组织很难进一步提升铸件质量, 因此需探索新工艺和浇注系统来保证铸件综合性能。

本研究旨在通过新的铸造工艺、浇注系统和冷却工艺设计, 控制铸件的力学性能和内部质量, 以期满足设计提出的各方面要求; 通过前期各类工艺参数调试, 获得适合该类铸件铸造工艺的方法, 为类似铸件的铸造工艺设计提供参考。

1 铸件结构及技术要求

舱体铸件为典型的回转体铸件(图1所示), 其外形尺寸为 $\Phi 1\ 200\ \text{mm} \times 1\ 500\ \text{mm}$, 平均壁厚为5~8 mm, 铸件净重520 kg, 材料为HB 5480—1991中的ZL205A合金, 铸件需进行100%的X射线检验, 需满足HB 5480—1991 I类铸件: 内部不允许有裂纹、偏析、超标气孔及夹杂缺陷, 圆形针孔不允许超过3级, 长形针孔不允许超过2

作者简介:

杜旭初(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事铝合金铸造工艺及铸造铝合金的研究。电话: 010-62497153, E-mail: torden@139.com

通讯作者:

黄粒, 男, 高级工程师。电话: 15810592281, E-mail: hl_biam@163.com

中图分类号: TG249.6;

TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

06-0859-06

收稿日期:

2023-10-13 收到初稿,

2023-12-01 收到修订稿。



图1 舱体铸件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the cabin casting structure

级，海绵状疏松和分散状疏松均不允许超过2级；铸件不允许补焊；铸件本体切取力学性能（铸件按轴线按照象限线剖成4部分，每象限取12根，共48根，每象限允许2根试样偏低，但不能低于规定值的80%。）： $\sigma_b \geq 400$ MPa， $\sigma_{0.2} \geq 300$ MPa， $\delta_5 \geq 5\%$ ；铸件整体尺寸精度按HB 6103—2004 CT9验收。

2 铸件铸造工艺设计

2.1 ZL205A 合金舱体铸件工艺要求

舱体铸件选材为高强度铸造铝合金ZL205A，该合金成分复杂，其结晶温度范围较宽，达到近90℃，难以实现顺序凝固^[1]。而且ZL205A铸造性能较差，壁厚敏感性大，热裂倾向较大，较易产生疏松、偏析等铸造缺陷；设计铸造工艺时必须增强激冷和补缩，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ZL205A合金的高强度特性^[2]。

2.2 常规铸造工艺设计及存在的问题

常规砂型铸造铸件浇注过程中采用的缝隙式浇注系统^[3]，其横截面如图2所示（ n 为缝隙数量， S 为铸件外形的周长； δ 为缝隙内浇道的厚度； δ_{casting} 为与缝隙内浇道相连处铸件的壁厚； b 为缝隙内浇道的宽度； d 为缝隙立筒的直径）。

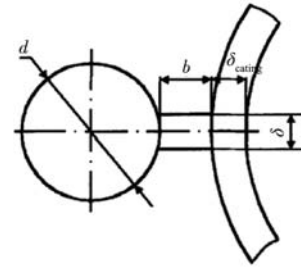


图2 缝隙式浇注系统截面示意

Fig. 2 Cross section diagram of the slot gating system

这种浇注系统由于平稳的充型和充型后在铸件内部建立的良好温度梯度被国内外铝合金铸造厂所广泛采用，生产出大量优质铝硅系合金铸件；但随着高强度ZL205A合金在舱体上广泛的应用，采用该浇注工艺生产的舱体铸件在进行X射线检测和荧光检测时，在铸件缝隙浇道处发现存在疏松缺陷（图3、4）。

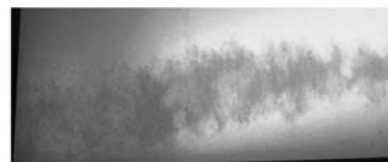


图3 铸件缝隙处X射线检验结果

Fig. 3 X-ray inspection results at the slot gate



图4 铸件荧光检测时浇口位置高亮显示

Fig. 4 Gate position highlighted during penetration inspection

将铸件整体加工后，在铸件外表皮缝隙浇道处发现有密集的显微疏松缺陷（图5）。

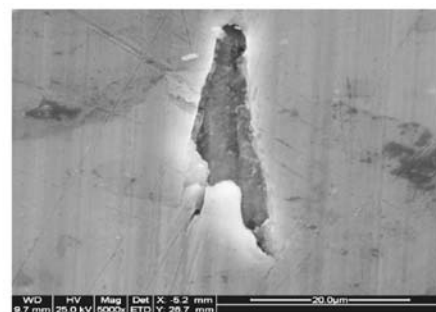
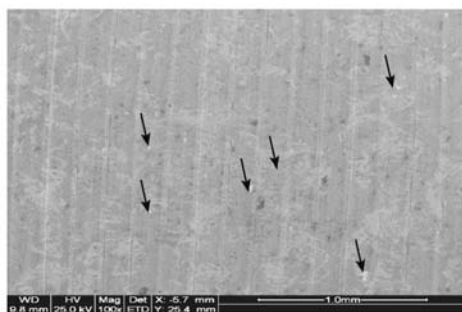


图5 铸件外表面低倍和高倍形貌

Fig. 5 The morphologies of the outer surface of the castings

垂直缝隙浇道沿纵向截取本体试样进行低倍、高倍观察，可以看出，靠近外表面存在很明显的疏松缺陷（图6、7）。

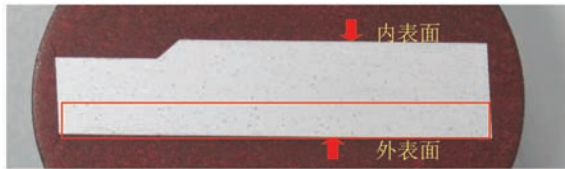


图6 低倍腐蚀形貌
Fig. 6 Corrosion morphology

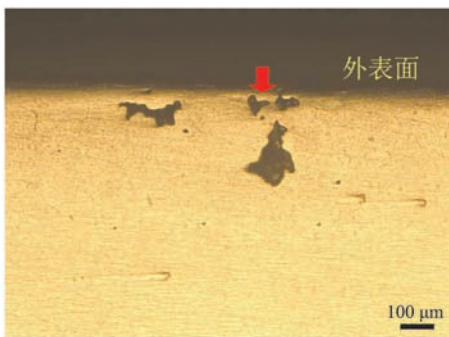


图7 表面处的显微疏松缺陷
Fig. 7 Microscopic porosity defects at the surface

通过对浇注系统进行数值模拟，模拟结果发现，缝隙浇道与铸件相接处的凝固温度高于与其毗邻区的温度，固相率也低于毗邻区（图8、图9所示）。因此缝隙浇道与铸件本体交接处成为浇注时的铸件的热节。铸件热节部位是极易出现铸造缺陷的部位，因为热节部位是铸件最后凝固的部位，也是凝固最后阶段最危险区域。

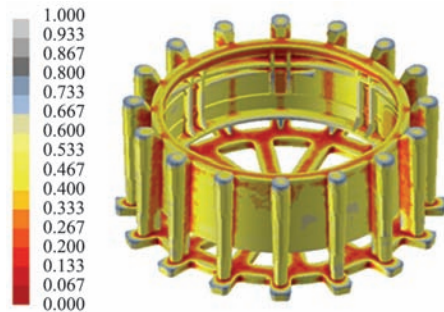


图8 铸件凝固固相率
Fig. 8 Solid Phase Rate of Casting Solidification

从以上分析结果可以看出，常规砂型铸造铸件浇注过程中采用的缝隙式浇注系统浇注ZL205A合金舱体时在铸件缝隙浇道处发现存在疏松缺陷，是由于铸件

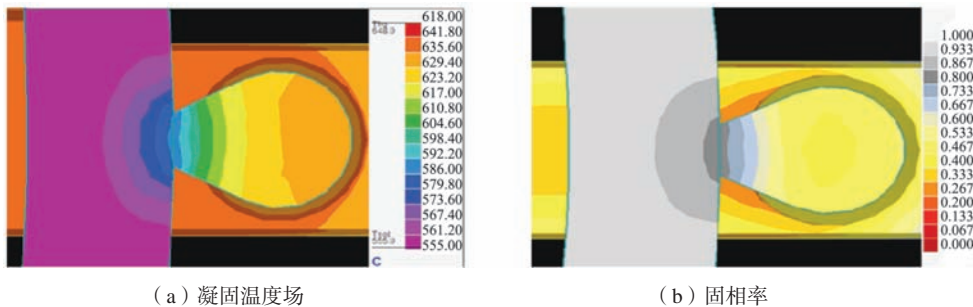


图9 缝隙浇道凝固温度场与固相率FEM仿真计算结果
Fig. 9 FEM simulation results of the slot gate

浇注系统跟铸件之间的热节引起，因为热节为铸件最后凝固的部位，加上ZL205A合金糊状凝固特性，导致最后凝固的部位无金属液补缩，从而在凝固后产生显微疏松。

2.3 工艺优化改进

ZL205A舱体铸件采用现有浇注系统来调控铸态微观组织很难进一步提升铸件质量，因此需探索新浇注系统来保证铸件的内部质量和综合力学性能。从上述分析可知，铸件浇注系统跟铸件之间的热节导致该部位产生了显微疏松缺陷。因此要从铸件浇注系统设计入手解决该问题，消除热节或者将热节外移至铸件本体外。引起热节最主要的原因是缝隙立筒浇道，因此缝隙立筒浇道的形状及尺寸是优化常规工艺的关键

点，此外冷铁设置位置以及冷铁尺寸也是该工艺的另外一个关键点。

根据上述分析结果，设计如图10缝隙浇道，该浇注系统与其他类似浇注系统最大的区别是其缝隙立筒

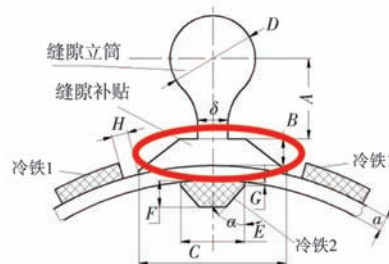


图10 改进后的缝隙浇道
Fig. 10 Improved slot gate

的形状,传统浇注立筒缝隙无缝隙补贴,该浇注系统包括传统浇注立筒缝隙加缝隙补贴,其可以降低该处铸件的过热,防止铸件与浇道交接处过热。在缝隙对面设置冷铁2,冷铁2的宽度小于缝隙补贴的宽度,第一可以加大该处的温度梯度,将过热区移至缝隙补贴区;第二该宽度不会使缝隙补贴区的补缩通道关闭,阻碍缝隙补贴区补缩铸件本体。

根据更改后的缝隙内浇道,设计新的浇注系统(详见图11)进行铸造工艺仿真。新工艺整体温度场及固相率分布数值模拟结果见图12,图中立筒附近温度略高于铸件,立筒附近的固相率从靠近铸件到远离铸件按从大到小顺序分布,说明立筒部可对铸件进行充分补缩;铸件整体热节外移且补缩合理,避免了铸

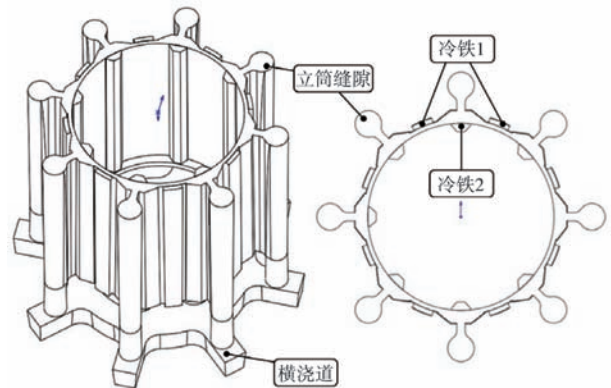


图11 改进后的浇注系统
Fig. 11 Improved pouring system

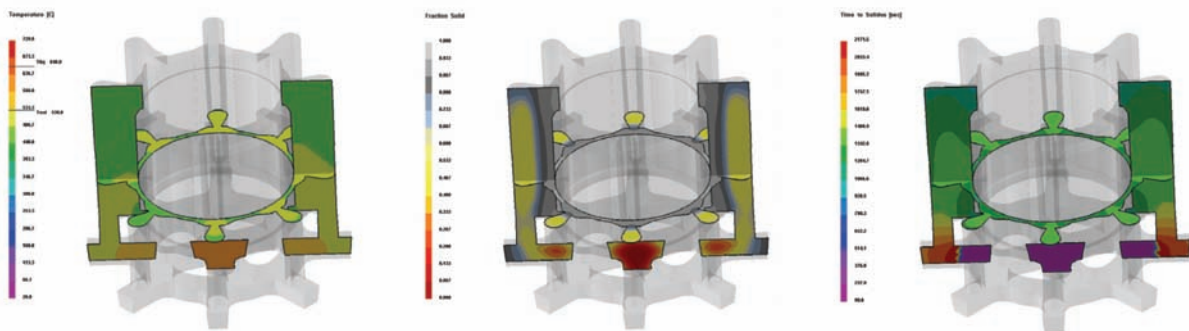


图12 模拟结果
Fig. 12 Simulation Results

件本体产生疏松缺陷。配合采用铸铁冷铁对缝隙对面进行激冷,防止了铸件本体过热,并创造了良好的顺序凝固条件。

3 工艺验证试验

3.1 铸件 X 射线检测

采用改进工艺浇注的铸件表面无明显铸造缺陷。采用工业射线机对铸件内部组织进行了检测,可探照区域未发现圆形针孔、长形针孔、疏松及直径大于0.5的气孔,铸件符合HB 963—2005 一类铸件,热节部位的X射线结果见图13。



图13 铸件热节部位的X射线检验结果
Fig. 13 X-ray inspection results of the hot spot area of the casting

3.2 零件 X 射线检测和荧光检测

为验证工艺有效性,将铸件按照图纸要求进行加工,加工后对热节部位进行X射线检验和荧光检验,结果均符合设计要求(图14、15)。

3.3 力学性能测试

根据上述工艺方案,试制了舱体铸件,表1给出了A区域内不同位置处的力学性能(取样部位如图16所



图14 加工后热节部位X射线检验结果
Fig. 14 X-ray inspection results of the hot spot after machining

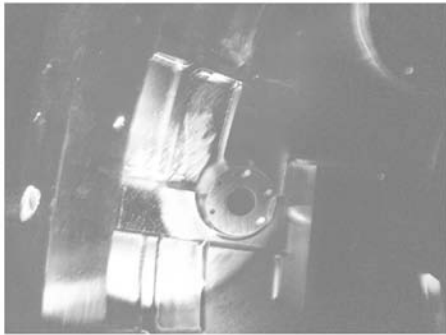


图15 荧光检验结果

Fig. 15 Penetration inspection results



图16 A区域内取样位置示意图

Fig. 16 Schematic diagram of the sampling locations in area A

表1 铸件A区切取性能

Table 1 Mechanical properties of the casting in area A

序号	σ_b /MPa	σ_s /%
1	433	8.3
2	414	9.7
3	452	8.8
4	426	10.8
5	470	9.7
6	420	10.9
7	479	12.1
8	483	12.7
9	447	17.1
10	451	16.1
11	444	17.7
12	450	19.2
技术要求	400	5

示)。图中所示的A区域壁厚较大,在液态金属与砂型的换热系数一定的情况下,液态金属的量越大,温度

下降越缓慢。因此,铸件越厚,凝固速度越慢,枝晶越发达。发达的枝晶将未完全凝固的金属分隔成大量的、独立微小区域,这些独立的微小区域凝固收缩后得不到液态金属的补缩。通常,越厚的铸件其致密度往往越低。由于单位面积内能够承受载荷的有效面积减少,合金的力学性能随着铸件的厚度而降低。按照本工艺方案研制的铸件,其A区域内切取的力学性能均能满足技术要求。

4 结论

(1) 铸件采用差压浇注方法,低热量浇注系统,配合低热量浇注系统使用的冷铁,铸件实现了顺序凝固,铸件热节外移至浇道补贴区域;

(2) 采用改进工艺浇注的铸件,X射线检测表明改进工艺方案成形下ZL205A舱体铸件表面与内部无明显组织缺陷,研制成功了符合技术条件要求的合格ZL205A舱体铸件;

(3) 采用改进工艺浇注的铸件,经检测内部质量优良,切取力学性能远超过了指标值。

参考文献:

- [1] 吕永丰,张启勋.薄壁铸件及其反重力成形技术[J].航空精密制造技术,1999(1):40-43.
- [2] 北京航空材料研究院.ZL-205高强度铸造铝合金的研究[R].北京:北京航空材料研究院,1977.
- [3] 李学朝.铝合金材料组织与金相图谱[M].北京:冶金工业出版社,2010.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 舒群,陈玉勇,徐丽娟.ZL205A合金组织与力学性能的研究[J].特种铸造及有色合金,2005(2):27-33.
- [8] 李弘英,赵成志.铸造工艺设计[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [9] 《有色金属及其热处理》编写组.有色金属及其热处理[M].北京:国防工业出版社,2000.
- [10] 葛瑞荣.薄壁壳体零件热处理变形控制工艺研究[D].成都:四川大学,2005.

- [11] 丁志杰, 卫永莉, 祝立龙. 厚壁ZL205A铝合金铸件铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2023, 72 (4): 455-457.
- [12] 阎汐睿, 韩梦霞, 林翰, 等. Al-TCB对ZL205A合金晶粒细化及强韧化行为的影响 [J]. 铸造, 2022, 71 (11): 1374-1381.
- [13] 黄粒, 高艳丽, 王海龙, 等. ZL114A铝合金舱体铸件裂纹形成原因分析 [J]. 铸造, 2021, 70 (10): 1223-1227.

Study on Casting Technology of Large ZL205A Aluminum Alloy Cabin Castings

DU Xu-chu^{1,2}, HUANG Li^{1,2}, LI Sha-sha^{1,2}, HE Mao-ling^{1,2}, HAO Hui-lin^{1,2}

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, AECC, Beijing 100095, China; 2. Beijing Engineering Research Center for Advanced Aluminum Alloys, Beijing 100095, China)

Abstract:

The research focused on the process of the ZL205A thick-walled cabin casting. Based on the characteristics of the cabin casting, the study conducted research on the design of casting process, numerical simulation calculations of casting process, and molten metal treatment techniques. The research results showed that by using the counter-pressure pouring method and a low heat pouring system with the assistance of chills, the casting achieved sequential solidification. The internal quality of the casting was excellent, and the mechanical properties exceeded the specified values. All indicators met the design requirements.

Key words:

aluminum alloy cabin; process design; low heat pouring system
