

一种 ZL114A 薄壁锥壳铸件的 铸造工艺研究

邵啊新, 李乐意, 蔡银枝, 宁二宾, 彭光辉, 曹胜涛, 焦燕妍, 陈恒周, 徐 帅

(洛阳航辉新材料有限公司, 河南洛阳 471000)

摘要: 某薄壁锥形壳体铸件为航空飞行器前端重要装置组件, 为ZL114A高强度铝合金铸件。因产品为半封闭结构, 铸造时易出现内部质量问题, 为了保证产品各项指标满足要求, 采用差压铸造结合计算机仿真模拟分析, 开展了对该铸件的铸造工艺研究, 研究过程中发现锥顶三角区域在凝固时易出现缩松缺陷, 结合仿真模拟对铸件凝固成形工艺进行了浇注系统的调整、增设冷铁等改进, 消除了缩松倾向, 完成了生产试制。铸件内部质量满足 I 类件要求, 附铸试棒平均抗拉强度、屈服强度、伸长率分别为364.67 MPa、306 MPa、7.5%, 满足各项技术指标要求。

关键词: ZL114A; 铝合金铸件; 锥形; 薄壁壳体; 计算机模拟; 差压铸造

随着现代航空、航天、汽车等工业的发展, 对铸件轻质化的需求越来越大, 而铝合金因比强度/比刚度高、密度低、耐腐蚀及加工性能优异且具有铸件成形性好等优点, 经冷/热加工成形与热处理后, 具有较佳的力学性能与材料物理性能^[1-3], 因此薄壁铝合金壳体铸件在国内外航空航天、兵工电子、船舶、核电等领域的应用十分广泛。近几年由于我国先进武器等装备的更新换代, 对铝合金铸件内部质量、力学性能以及尺寸精度等要求也在不断提高。某薄壁锥壳铸件为航空飞行器前端重要装置组件, 技术要求严格, 化学成分按照HB 962—2001标准执行, 质量要求按照HB 5480—1991 I 类件执行, 力学性能要求较高, 需按照HB 5480—1991标准中ZL114A-T6最高性能等级执行, $R_m \geq 300$ MPa、 $R_{p0.2} \geq 240$ MPa、伸长率 $A_5 \geq 3\%$, 零件整体不允许焊补, 特别是三角锥顶区域, 不允许存在任何形式的铸造缺陷。

目前薄壁壳体类铝合金铸造成形技术主要以熔模精密铸造及砂型铸造两种为主, 浇注方式有重力浇注和反重力浇注(含低压浇注、差压浇注两种), 该铸件为一种尺寸相对较大的薄壁壳体类铸件, 性能要求较高, 若采用熔模精密铸造方式进行浇注, 因铸件尺寸较大, 制壳、浇注均存在一定的困难, 且精密铸造力学性能相对偏低, 无法满足该铸件性能要求; 而砂型铸造具有较好的工艺操作性, 能够在浇冒口系统设计及冷铁设置上进行较为便宜的工艺优化, 以改善铸件内部质量, 保证铸件致密度, 提高铸件整体力学性能; 由于该铸件为薄壁壳体铸件, 壁厚相对较薄, 浇注时金属液在型腔内流动性不好, 需较高的浇注温度, 但重力浇注补缩效果差, 且易产生针孔等缺陷, 所以为保证铸件的整体质量要求, 采用反重力的方式进行浇注; 该铸件为I类铸件, 对缩松、缩孔、针孔、夹渣等铸造缺陷要求严格, 有研究表明, 差压铸造的补缩能力是低压铸造的4~5倍^[4], 为保证产品一次开发成功率, 选用差压浇注的方式进行铸造是较为稳妥的, 使铸件在压力作用下结晶凝固, 可以提高铸件成形的可靠性和浇注系统的补缩能力, 保证获得致密度更高的铸件, 提高铸件的内部质量和力学性能。采用砂型造型+差压浇注的工艺方案进行产品试制研究。

作者简介:

邵啊新(1986-), 男, 工程师, 学士, 研究方向为有色金属砂型铸造。电话: 15038582417, E-mail: shaoaxin_luobei@163.com

通讯作者:

宁二宾, 男, 副高级工程师。电话: 18638819333, E-mail: lyhhxcl@163.com

中图分类号: TG292

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2024)

04-0565-06

收稿日期:

2023-06-07 收到初稿,

2023-12-10 收到修订稿。

1 铸件结构分析

该产品外形最大尺寸为 $\Phi 500\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$ ，主体厚8 mm，上部为三角尖锥结构，下部为球体结构，见图1零件示意图。该产品外形全加工，端口内法兰面加工，其余内腔不加工，为防止因铸件偏差造成零件加工后有皮厚偏薄影响零件整体强度，内腔非加工面单边放补正1 mm，以保证铸件加工后壁厚要求，外形加工单边设置6 mm加工余量，底面设置加工余量6 mm。另由于加工工艺要求，锥顶需增加加工工艺凸台，下底面需增加整圈加工工艺圆环，铸件单件毛重60 kg，参考以往生产经验，铸件缩尺整体设置为1%，铸件结构见图2。



图1 锥体零件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the conical part



图2 锥体铸件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the conical casting

2 铸造工艺方案设计

铸件整体壁厚较为均匀，结构相对简单，采用环形均布缝隙式浇注系统，能够保证凝固过程中有效补缩及浇注时金属液平稳的充型，根据铝合金铸造常用的缝隙经验公式(1) - (3)计算出立筒缝隙浇道规格及数量^[5]，横截面见图3。

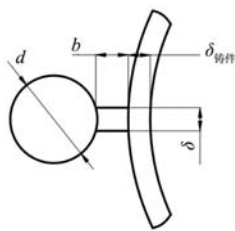


图3 立筒横截面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the flow gate

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

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

$$b = 15 \sim 35\text{ mm}$$

$$d = (4 \sim 6) \delta \quad (3)$$

式中： n 为立筒数量； S 为铸件外形的周长； δ 为缝隙内

浇道厚度； $\delta_{\text{铸件}}$ 为与缝隙内浇道相连处铸件的壁厚； b 为缝隙内浇道宽度； d 为立筒直径。

立筒数量及立筒、缝隙尺寸的确定，事实上还受产品结构特点、技术要求、立筒和缝隙内浇道的补缩范围、冷铁的设计及经验等因素的影响，因该铸件壁厚较薄，补缩距离有限，固采用多道缝隙式浇注系统能够有效地保证立筒的补缩距离。为保证铸件质量，通过计算结合经验，缝隙厚度 b 取20 mm，立筒 d 取60 mm，缝隙数量 n 取8，横浇道截面 $50\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ ，直浇道 $\Phi 120\text{ mm}$ ，因铸件顶部设置有加工工艺台，将工艺台设置成倒锥形作为顶部冒口使用，同时兼具集渣功能。为了得到内部致密、性能优良的铸件，在每两根立筒中间设置冷铁激冷，增加冷却末端区，从而扩大立筒补缩距离，保证产品形成从铸件至立筒的顺序凝固状态，确保内部质量。锥顶由于空间较小，不便放置冷铁；底部法兰厚区，设置内圆整圈冷铁及底面整圈冷铁激冷，使其形成自内而外、自铸件至浇注系统的顺序凝固梯度，保证厚区的内部质量。浇注系统及冷铁分布见图4、图5。

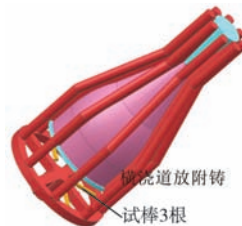


图4 浇注系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the pouring system



图5 冷铁分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the chills

3 浇注参数的确定

该铸件技术要求严格，为I类铸件，不允许焊补，为了保证铸件内部质量及力学性能要求，需确保铸件整体无缩松、缩孔、针孔、夹渣等铸造缺陷。而差压浇注时金属液始终是在一定压力下充型及结晶凝固的，既可强化金属液补缩又能抑制氢的析出；同时由于受压力作用，整个充型过程金属液平稳地充满型腔，能够有效地避免缩松、缩孔、针孔及夹渣缺陷的产生。根据差压铸造常用的铸造公式及经验确定相关工艺参数，压差 Δp 常用的计算公式如下：

$$\Delta p = \mu \rho g H \quad (4)$$

式中： Δp 为金属液充满铸型所需压力差(Pa)； H 为充型结束时，坩埚液面至铸件顶端的距离(m)； ρ 为金属液的液密度(kg/m^3)； g 为重力加速度(m/s^2)； μ 为充型阻力系数， $\mu=1.0 \sim 1.5$ ，阻力小取下限，阻力大取上限。

由于该铸件结构均匀、异形结构少，阻力系数取下限1.2，经公式（4）计算压差 Δp 定为62 kPa，一般金属液升液速度及充型速度控制在20~80 mm/s时，能够减少金属液在型腔中产生卷气、夹渣、冲砂等倾向。结合以上情况，设置了各阶段压力及升压时间见表1。

表1 各阶段压力及升压时间
Table 1 Pressure at each stage and boost time

参数	升液	充型	增压	保压	泄压
压力/kPa	19	62	118	118	0
时间/s	24	72	100	460	-

该铸件成品主体壁厚较薄，所以为了保证金属液既具有很好的流动性又减小金属液的收缩和针孔倾向的前提下，根据以往浇注经验，浇注温度设置在 $(720 \pm 10)^\circ\text{C}$ 时浇注为宜。

4 计算机CAE模拟分析

为了确认铸造工艺及浇注参数是否可行，对该方

案通过计算机CAE模拟软件进行了分析研究。经计算机模拟发现铸件锥顶冒口根部向下50~180 mm范围整圈存在一定的缩松风险，另外冒口内缩松较深，锥尖部同样存在缩松风险，缩松分布见图6。

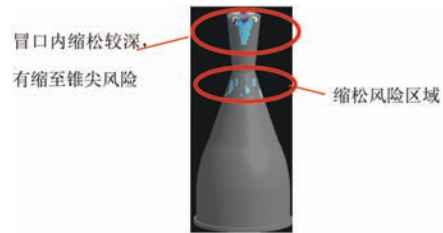


图6 缩松分布图

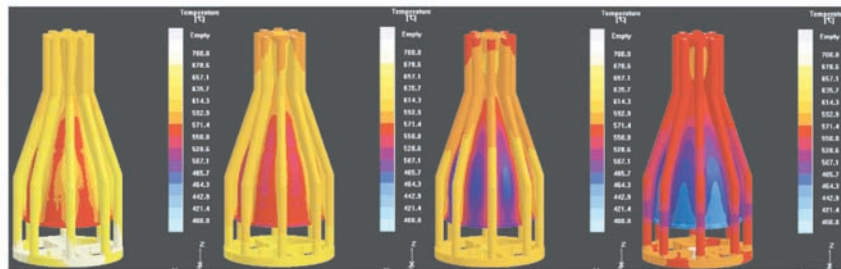
Fig. 6 Distribution of the porosity

由于存在缩松风险，根据模拟结果，分别从模拟的充型过程、温度场分布及凝固过程进行了分析，如图7所示。

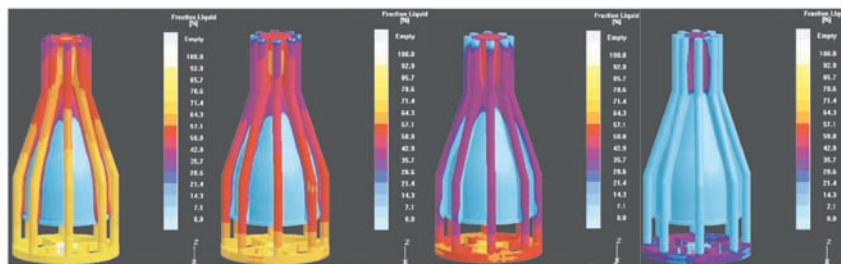
通过图7a可以看到，整个充型过程平稳、无飞溅，充型速度稳定，充型参数合理。由图7b温度变化及分布情况可以直观地看到，在整个温度变化过程中



(a) 充型过程



(b) 温度场变化及分布



(c) 凝固过程

图7 模拟结果

Fig. 7 Simulation results

浇注系统整体自下而上基本形成了由高到低的温度梯度，铸件上立缝中间温度明显低于立筒，形成了自立筒至铸件的温度梯度，但同时可以看到，未放置冷铁的锥顶温度在各阶段均明显高出下部放冷铁部位，存在一定的缩松风险，与图6缩松风险区域吻合。由图7c铸件的凝固过程中可以看到，锥顶未放冷铁区域和顶部冒口区液态持续时间过长，且锥顶未放冷铁区与上部冒口及立筒未形成明显的凝固梯度，存在缩松风险，此结果也与图6缩松风险区域吻合；同时能看出，最后凝固时顶部冒口内液态区较深，致使锥尖有缩松风险，与图6冒口内缩松趋势相符合。

经过分析研究，整个充型过程平稳，铸造的浇注参数合理，不是造成铸件产生铸造缺陷风险的因素。由图7b温度场变化及分布和图7c凝固过程分析，铸件产生缩松缺陷的主要因素是铸件上端为封闭状态，顶部被金属液包围，缺乏有效地散热区域；铸件为尖锥

炮弹结构，自下而上截面积越来越小，砂型受热辐射严重，造成顶部过热，且由于截面积变小，8根立筒在上部立缝间距过小，使锥顶及冒口部位热量过于集中，进一步扩大了过热区，以上因素是造成锥顶缩松风险及冒口缩松过深的主要原因。

5 工艺改进

5.1 工艺优化

基于上述的模拟结果及原因分析，对以上工艺方案进行优化调整，原立筒、立缝及横浇道等浇注系统数量及尺寸保持不变，将上部锥顶区域的8根立筒中对称4根取消，对应部位铺设冷铁进行激冷，其余4根立筒仍至冒口顶端位置以期使铸件获得更加合理的温度场，锥顶砂芯顶部放置随形冷铁激冷，减小锥顶过热现象，达到“铸件整体同时凝固，分区局部顺序凝固”^[6]的目的，如图8所示。

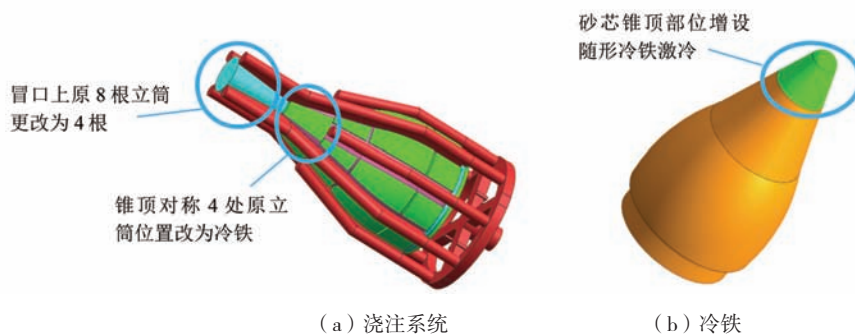


图8 优化后浇注系统及冷铁示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the pouring system and chills after process optimization

5.2 计算机 CAE 模拟

工艺优化后经计算机CAE模拟软件模拟确认，分别通过温度场、凝固过程及缩松分布对工艺可行性进行了分析研究，如图9。

由图9a温度分布情况可以看到，整体自下而上基本形成了温度由高到低的温度梯度，铸件温度明显低于立筒温度，形成了自立筒至铸件的温度梯度，且锥顶部位与立筒和上部冒口之间形成了明显的温差，符合工艺预期。由图9b铸件的凝固过程中可以看到，锥顶放置冷铁区与下部放置冷铁区同时凝固，锥顶过热区消除，符合工艺预期。观察缩松分布图，铸件整体

无缩松风险，锥尖冒口缩松区域可控，距离锥尖部位具有一定安全距离。

经过计算机CAE软件模拟分析研究后认为，该工艺优化方案能够达到预期效果，消除了缩松风险。

6 铸件试制

铸造方案优化后，进行了试生产，为了保证金属液质量，采用合格的成品铝锭进行了铝液熔化，经变质处理及精炼除气后检验断口样及氢含量均满足生产要求，金属液化学成分检验合格后炉内测量金属液温度721℃时对铸件进行了浇注。化学成分见表2。

表2 化学成分要求及检测结果
Table 2 Chemical composition requirements and test results

项目	Si	Mg	Ti	Fe	Zn	Cu	Mn	Be	其他
HB 962—2001	6.5~7.5	0.45~0.75	0.08~0.25	≤0.20	≤0.10	≤0.10	≤0.10	≤0.07	≤0.15
检测结果	6.72	0.56	0.12	0.07	0.03	0.01	0.01	0.04	0.01

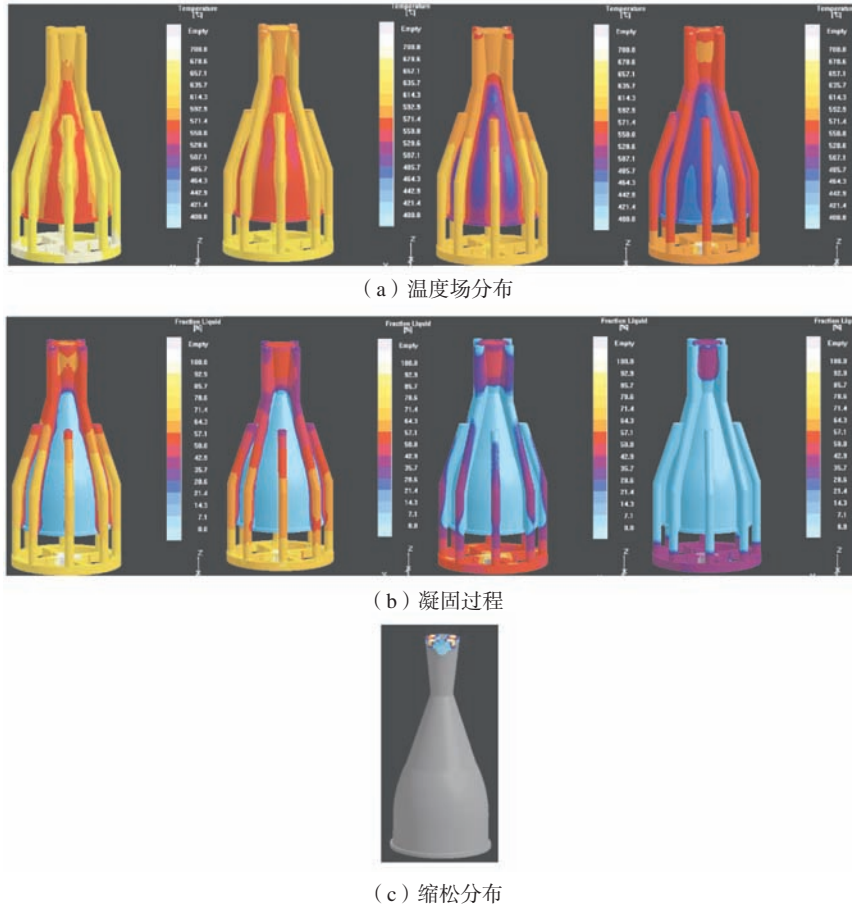


图9 优化后模拟结果

Fig. 9 Simulation results after process optimization

(1) 内部质量。完成浇注、清理后，对铸件进行了表面清理并经加工去处浇道，经X射线探伤，未发现超标缺陷，铸件初步检测内部质量合格。图10为铸件X射线探伤照片。

(2) 力学性能。Al-Si合金的性能主要取决于合金中 α 固溶体的性能、晶粒大小、亚结构及第二相的性能、数量、大小、形状和分布等。T6处理就是使共晶体中的Si相完全变为细小颗粒状弥散存在于枝晶和二次枝晶间，经固溶处理时 Mg_2Si 溶入固溶体中，时效时析出，使晶体点阵发生畸变，从而强化合金性能。

探伤结果确认合格后，对铸件及附铸试棒进行了同炉次“固溶+人工时效”热处理，并对同炉附铸试棒进行了力学性能检测，结果显示，力学性能完全能够满足相关标准要求，数据见表3力学性能。

(3) 尺寸情况。铸件经过初检、终检及最终加工成品检验，所有尺寸均满足相关质量要求，加工成品图见图11。

表3 力学性能
Table 3 Mechanical properties

项目	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ_5 /%
标准值	300	≥ 240	≥ 3
试棒1	366	307	8
试棒2	367	308	8
试棒3	361	303	6.5
实测平均值	364.67	306	7.5



图10 铸件X射线探伤
Fig. 10 X-ray inspection of the casting



图11 成品图
Fig. 11 Photo of the part

7 结论

(1) 薄壁壳体类铸件通过差压铸造的方式进行铸造成形, 由于整个充型及凝固过程都是在一定的压力下实现的, 不但能够保证金属液充型平稳、无飞溅, 而且在整个凝固过程中能够有效的减少氢气析出, 降低了铸件夹砂、氧化渣及针孔等缺陷的产生的倾向, 且压力下凝固能够使铸件整体致密度更加良好, 提高产品的力学性能。

(2) 通过计算机CAE模拟软件对铸造工艺方案进行仿真模拟, 能够直地对铸造工艺设计及浇注参数进行分析研究, 并通过工艺优化、计算机模拟辅助验

证, 可以有效地降低铸件缩松倾向的风险。

(3) 薄壁锥形铸件顶部为封闭结构, 被金属液包围, 缺乏散热面, 砂芯顶部易形成过热区, 使锥尖区域金属液冷却速度慢, 液态持续时间长, 且顶部冒口部位立筒密集, 进一步增大过热区, 使冒口及下部铸件不能形成有效的顺序凝固梯度, 中心收缩加深, 增加了铸件顶部缩松、缩孔的风险。通过对外形顶部减少立筒浇道、增设冷铁, 砂芯顶部设置随形冷铁等措施, 可以使锥顶区域达到顺序凝固的目的, 避免了缺陷的产生。

参考文献:

- [1] 唐剑, 王德满, 刘静安, 等. 铝合金熔炼与铸造技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [2] 李欣珂, 于鑫泓, 于金瑞, 等. 铝合金转向壳铸造工艺数值模拟及优 [J]. 铸造, 2022, 71 (12): 1561-1564.
- [3] 李尹, 熊俊杰, 冯志军, 等. Al-Si系铸造合金热处理工艺研究进展 [J]. 铸造, 2022, 71 (5): 544-548.
- [4] 叶凤柏, 郭李胜, 周亚军, 等. 低压、差压和调压铸造工艺原理及其优势 [J]. 铸造工程, 2013 (4): 19-21.
- [5] 姜不居. 铸造手册: 第6卷 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [6] 李华文, 岳野, 阮明, 等. ZL114A 尾减机匣铸件铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (8): 976-979.

Research on the Casting Process of a ZL114A High Strength Aluminum Alloy Thin Wall Conical Shell Casting

SHAO A-xin, LI Le-yi, CAI Yin-zhi, NING Er-bin, PENG Guang-hui, CAO Sheng-tao, JIAO Yan-yan, CHEN Heng-zhou, XU Shuai
(Luoyang Hanghui New Material Co., Ltd., Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract:

A thin-walled conical shell casting is an important component of the front end device of an aircraft. It is a ZL114A high-strength aluminum alloy casting. Due to the semi closed structure of the product, internal quality problems are prone to occur during casting. In order to ensure that the various indicators of the product meet the requirements, counter-pressure casting combined with computer simulation analysis was used to conduct casting process research on the casting. During the research process, it was found that the triangular area of the conical top was prone to shrinkage defects during solidification. By combining simulation, the improvements were made to the casting solidification forming process, such as adjusting the gating system and adding chills, eliminating the tendency of shrinkage porosity. Production trial production was completed, and the internal quality of the casting met the requirements of Class I parts. The average tensile strength, yield strength, and elongation of the attached cast test bars were 364.67 MPa, 306 MPa, and 7.5%, respectively, meeting the requirements of various technical indicators.

Key words:

ZL114A; aluminum alloy casting; conical; thin-walled shell; computer simulation; counter-pressure casting