DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.10.005

大型铝合金基座铸件数值模拟研究

范李鹏[1],姬艳硕[1],余国康[1],冯港雯[1],徐信锋[1],王宝兵[1,2],杨　剑[1],肖三楚[1]
(1.上海航天精密机械研究所,上海 201600;2. 上海交通大学 材料科学与工程学院,上海 200240)

摘　要:大型复杂结构铝合金基座铸件内部质量要求高,采用 ProCAST 数值模拟软件,对大型铝合金基座铸件进行数值模拟以优化铸造工艺。结果表明,采用 3 个直浇道、12 个内浇道的浇注系统并不能很好的成形大型铝合金基座铸件,常伴有大面积的冷隔。将浇注系统改为 4 个直浇道、16 个内浇道的浇注系统后成形良好。大型铝合金结构件基座的最佳浇注温度为 730 ℃,浇注时间为 100 s,在该工艺条件下,铸件成形性好,内部质量优异。

关键词:数值模拟;铝合金;结构件;铸造工艺

中图分类号: TG292　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)10-0856-05

Research on Numerical Simulation of Large Aluminum Alloy Base Casting

FAN Lipeng[1], JI Yanshuo[1], YU Guokang[1], FENG Gangweng[1], XU Xinfeng[1], WANG Baobing[1,2], YANG Jian[1], XIAO Sanchu[1]

(1. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Large, complex structure of aluminium alloy base high quality demand of castings, using numerical simulation software ProCAST, large aluminum alloy base castings were numerically simulated to optimize the casting process. The results show that the casting system with 3 sprues and 12 ingates cannot obtain good large aluminum alloy base castings well, and there is often a large area of cold lap. The gating system with 4 sprues and 16 ingates can obtain good castings after adjustment. The optimum pouring temperature and pouring time of large aluminum alloy structure base are 730 ℃ and 100 s. Under these conditions, the castings have good formability and excellent internal quality.

Key words: numerical simulation; aluminum alloy; structural parts; casting process

大型铝合金基座铸件为 ZL101A 合金，属铝硅合金,其主要合金元素为 Si,含量为 6.5%~7.5%[1-2]。轮廓尺寸为 1 600 mm×1 750 mm×450 mm，外围框架整体壁厚仅为 10 mm，且铸件多减重孔和加强筋,属大型薄壁复杂结构件,因薄壁的存在及其内部较为复杂的相交结构,极易产生浇不足、冷隔、疏松等缺陷;铸件指定区域需进行 X 光检测,内部质量按 II 类铸件进行判定，验收标准按照 QJ169A-2011 执行。传统铸件的生产主要依靠工程技术人员的实际工作经验，缺乏科学的理论依据。特别对于复杂件和重要件,生产中往往要反复地修改铸件结构或铸造工艺方案来达到最终的技术要求,这种“经验+实验”的工艺方法,导致铸件的研制周期长、成本高、质量不可靠等弊端,已不能适应工业发展的要求[3-5]。

随着计算机技术的发展，将传统铸造与计算机数字化高新技术相结合的铸造计算机模拟仿真技术应运而生,以达到缩短铸件研制周期、对缺陷产生进行预判的目的。自 1962 年丹麦人 Fursund 最先开始采用计算机来进行铸件温度场的模拟以来，欧美一些工业发达国家的一些大学和研究机构在各国政府数千万美元的巨额资助下，对铸造过程数值模拟技术进行了大量的研究和开发，研制出了多项科研成果,商品化软件系统已在很多重要的工矿企业应用。最著名的商品化软件系统有德国的 MAGMASOFT,美国 PROCAST（现被法国 ESI 集团收购)、FLOW-3D 等。国内的铸造过程数值模拟研究始于 20 世纪 70 年代末期,大连理工大学、沈阳铸造研究所、哈尔滨工业大学、清华大学、华中科技大学等单位先后开展研究,取得了一些成果。一些商品化软件已在实际生产中发挥了越来越重要的作用，如清华大学的铸造之星 /FT-Star、华中科技大学的华铸 CAE/InteCAST 等[6]。

本文作者采用数值模拟软件 ProCAST 对基座铸件充型凝固过程进行模拟仿真,优化铸造工艺,以

收稿日期:2021-03-21
基金项目:上海市青年科技启明星计划资助项目(18QB1401400)
作者简介:范李鹏(1992—),江苏南通人,硕士生.主要从事轻合金铸造技术方面的工作.电话:02137842904,Email:flpnjust@163.com

消除铸件缺陷，提高内部质量。

1　铸造工艺设计

1.1　基座三维模型

基座为框架结构件，轮廓尺寸为 1 600 mm×1 750 mm×450 mm，筋条壁厚为 10 mm，筋条交接处直径>40 mm，为热节区，在浇注过程中易产生缩松缺陷。铸件底面为安装面，对铸件内部质量要求较高，加工后不得出现明显缩孔缩松缺陷。采用三维几何造型软件 Pro/E 建立了铝合金基座的三维模型，如图 1。

图 1　基座三维结构图
Fig.1　3-dimensional structure of base casting

1.2　铸造工艺方法

基座采用砂型铸造，手工造型。为了获得高强度的砂型和砂芯，在造型时采用自硬树脂砂造型及制芯，并在大气环境下进行重力浇注。

1.3　铸造工艺方案

根据基座的结构特点，设计铸造工艺方案，采用中间分型的形式，横浇道放置在中间分型面上，以保证铸件的充型完整，内浇道采用立筒加缝隙的形式，总共设置内浇道 12 个，直浇道 3 个，如图 2。考虑到铸件内部质量的保证，在厚大部位设置补缩冒口。基座底面为安装面，为保证其内部质量，在底面上放置激冷冷铁，此外，在铸件内部的小凸台上也设置激冷冷铁。

将造型好的铸件模型，以标准接口 *.igs 等格式输出，将输出结果导入 MeshCAST 中进行面网络和体网格的剖分。接着对其进行三维网格划分，为了更好的反映铝合金实际浇注的情形，网格划分的数目应尽可能多，以便对铸造细节进行合理的预测，提高铸造数值模拟的精度和准确性。图 3 为铝合金基座铸件的网格划分示意图，模型总共划分为约 150 万个体单元。

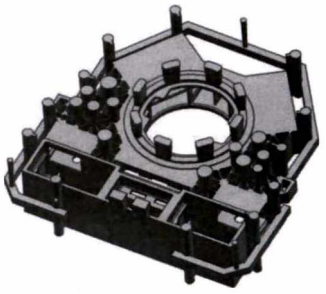


图 2　基座铸件的浇冒系统
Fig.2　Gating and risering system of base casting

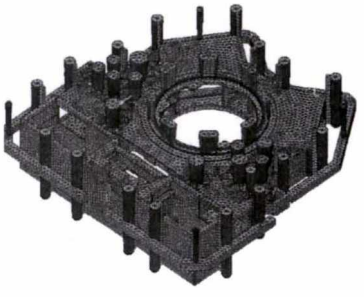
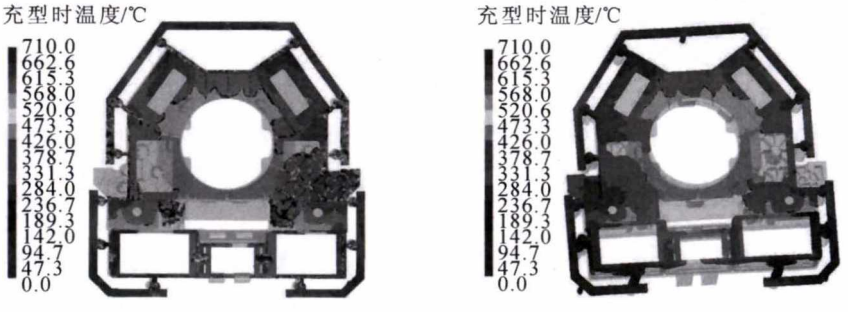


图 3　铸件网格划分简图
Fig.3　Schematic mesh generation

2　铸造工艺数值模拟

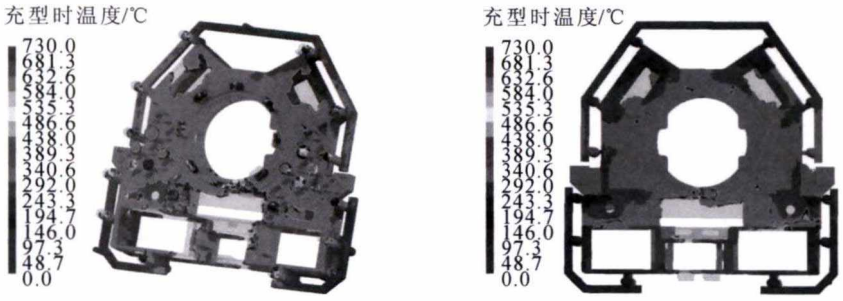
建立带浇注系统的三维模型，利用 ProCAST 铸造模拟软件对铸造工艺进行数值模拟，结合铸件的结构特点以及 ZL101A 合金的铸造特点，设定浇注温度为 710 ℃，浇注时间为 150 s。结果如图 4，从图 4 中看出，在该工艺条件下，铸件大部分均不能充满，有大面积的冷隔，无法浇注出完整的铸件。

根据数值模拟结果，对铸件的浇注工艺进行调整，将浇注温度调整为 730 ℃，其模拟结果如图 5。



(a)上平面　　(b)下底面

图 4　浇注温度 710 ℃，浇注时间 150 s 时基座铸件模拟结果
Fig.4　Simulation results of base casting under pouring temp.710 ℃ and time 150 s



(a)上平面　　(b)下底面

图 5 浇注温度 730 ℃,浇注时间 150 s 时基座铸件模拟结果

Fig.5 Simulation results of base casting under pouring temp. 730 ℃ and time 150 s

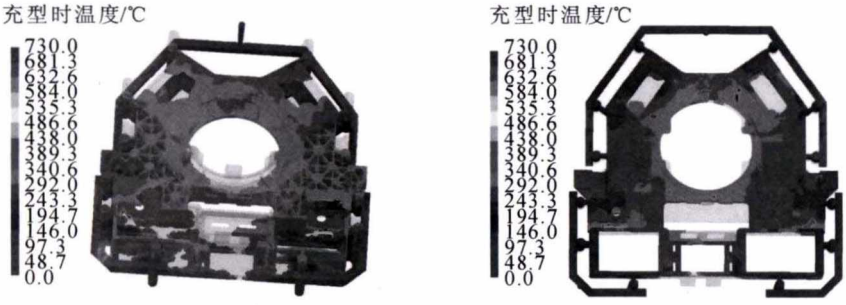
可以看到,提高浇注温度后,铸件下底面充型完整,但是在上平面上还存在较大面积的冷隔,浇注后铸件温度下降较快,大部分区域温度在 600 ℃以下。

继续调整铸造工艺,在 730 ℃浇注温度下缩短浇注时间,由 150 s 变为 100 s,然后进行数值模拟,其结果如图 6。可以看出,铸件前部充型完整,但是铸件后部依然存在冷隔。

综上所述,在原先设计的浇注系统条件下,将浇注温度调整为 730 ℃,浇注时间调整为 100 s 后,铸件浇不足现象有所改善,但是依然无法获得完整的铸件,合金液充型后冷却速度较快,存在大面积冷隔。

因此,需要对浇注系统进行调整。将铸件直浇道由原先的 3 个增加为 4 个,将铸件立筒数量由原先的 12 个增加为 16 个,提高合金液充型能力,调整后的铸件浇注系统如图 7 所示。

对调整后的铸件浇注工艺建立三维模型并进行数值模拟,铸件能够充型完整,图 8 为铸件充满时的



(a)上平面　　(b)下底面

图 6 浇注温度 730 ℃,浇注时间 100 s 时基座铸件模拟结果

Fig.6 Simulation results of base casting under pouring temp. 730 ℃ and time 100 s

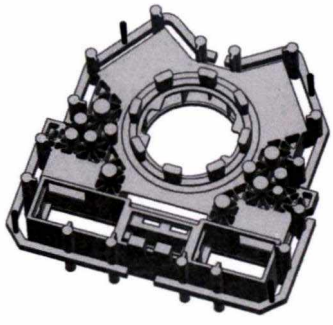


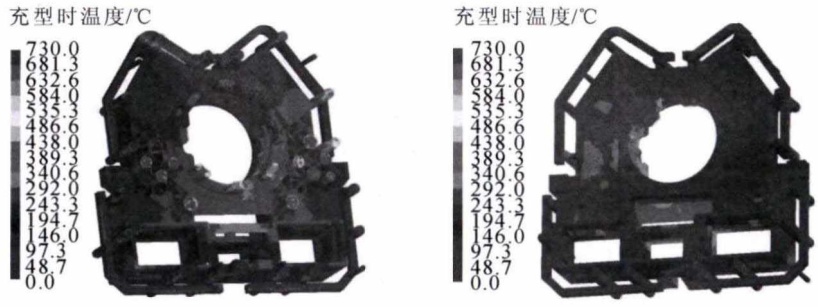
图 7 调整后的基座铸件三维浇冒系统

Fig.7 3-dimensional gating and risering system of base casting after adjustment

温度。从中看出,调整浇注工艺后,铸件底平面上温度较高,为 680 ℃以上,在铸件中心位置,合金液温度为 580 ℃左右。这说明,由于铸件尺寸较大,合金液流动距离较长,温度下降的较多,当铸型完全充满时,中间区域已经开始凝固。

图 9 为铸件凝固时间,从中可以看出,在铸件减重孔位置,由于其附近有 2 个直浇道,上部放置有保温冒口,造成该区域合金液较热,凝固时间慢。在反面有 2 块安装凸台,其壁厚超过 25 mm,较周围区域厚出较多,凝固时间也较慢。其余部位整体壁厚在 10 mm 左右,凝固时间较快,为 180~300 s,在浇口位置,由于大量合金液通过浇口进入铸型,因此其凝固时间也较慢,为 500 s 左右。

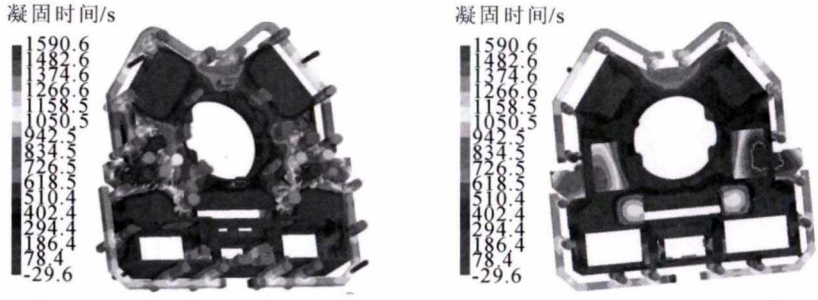
对铸件进行疏松缺陷的预测,如图 10,从中看出,铸件倾向于整体凝固,在铸件内部有较多小面积疏松。在浇注系统和冒口内,疏松面积最大。对疏松进行逐层扫描,在减重孔的中心,即筋板交接位置,存在较多疏松,这从铸件凝固时间上也能看出,由于该部位附近有 2 个直浇道,上部放置有保温冒口,造成该区域合金液较热,凝固时间慢,造成疏松缺陷的产生。另外在铸件后端框位置有 1 块厚凸台,由于其



(a)上平面　　(b)下底面

图 8 铸件充满时的温度分布

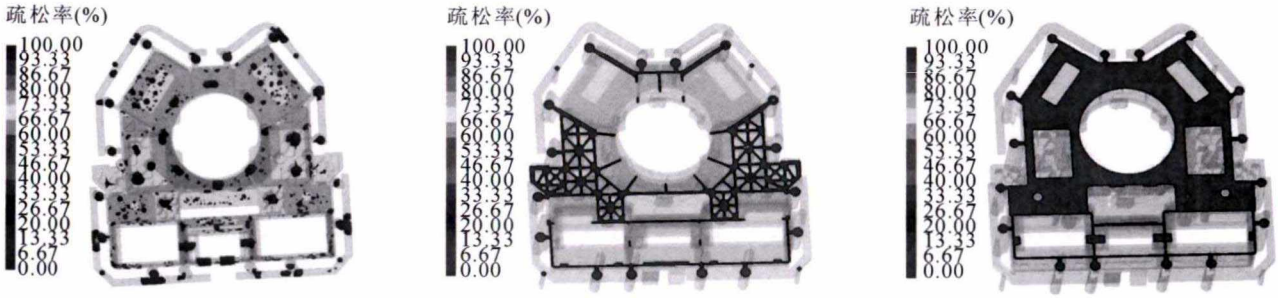
Fig.8 Temperature distribution of the casting after filling completion



(a)上平面　　(b)下底面

图 9 铸件凝固时间

Fig.9 Casting solidification time



(a)铸件整体疏松　　(b)截面一疏松情况　　(c)截面二疏松情况

图 10 铸件疏松缺陷预测

Fig.10 Porosity defect prediction in the base casting

厚度较厚,故也有疏松缺陷的产生。

3 铸造工艺优化

根据铸件的数值模拟结果对铸件的铸造工艺进行了调整,主要包括:

(1)浇注系统调整　采用 4 面浇注的形式,直浇道由原来 3 个增加为 4 个,缝隙内浇道由原来 12 个增加为 16 个。

(2)浇注参数调整　浇注温度由原来 710 ℃改为 730 ℃,浇注速度由原来的 150 s 改为 100 s。

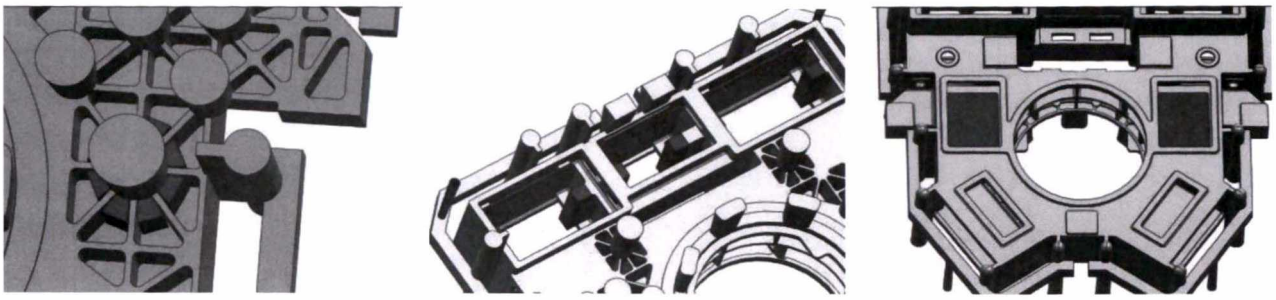
(3)冷铁工艺调整　根据数值模拟结果,在疏松位置设置激冷冷铁,改善局部冷却速度,保证产品内部质量。在减重孔下方增加成形冷铁,如图 11 中图(a),在后端部分的大凸台上放置成形冷铁,如图 11 中图(b),在 2 块大凸台上放置成形冷铁,如图 11 中图(c)。

4 铸件浇注验证

根据铝合金基座铸件的数值模拟结果,采用优化后的铸造工艺方案,实际浇注基座铸件。铸件成形性好,铸件清理后在表面没有肉眼可见的气孔等铸造缺陷,表面质量良好。通过 X 射线检测,对照标准 QJ169A-2011《铝合金铸件规范》,内部无超标缺陷,满足设计要求。

5 结论

(1)ProCAST 数值模拟结果表明,对于整体壁厚为 10 mm,轮廓尺寸为 1 600 mm×1 750 mm×450 mm 的大型铝合金结构件基座,采用 3 个直浇道、12 个内浇道的浇注系统并不能很好的成形,会



(a)冷铁工艺改进一　(b)冷铁工艺改进二　(c)冷铁工艺改进三

图 11 增加冷铁以减轻和消除缩松缺陷

Fig.11 Adding chills to reduce and eliminate shrinkage porosity

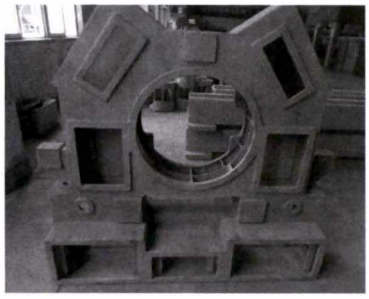


图 12 基座铸件照片

Fig.12 12 Picture of base casting

有大面积的冷隔。将浇注系统改为 4 个直浇道、16 个内浇道的浇注系统后能够很好的成形。

(2)大型铝合金结构件基座的理想浇注温度为 730 ℃,浇注时间为 100 s,在该工艺条件下,铸件成形良好。

(3)根据铸件结构和 ProCAST 数值模拟结果，对铸造工艺进行优化，调整后铸造工艺效果良好,其内部质量均能满足产品设计指标。

参考文献:

[1] 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):3-7.

[2] 彭晋民，钱翰城. 铸态铸造铝硅合金的现状和发展 [J]. 铸造技术,2000(6):32-34.

[3] 柳百成,荆涛. 铸造工程的模拟仿真与质量控制[M]. 北京:机械工业出版社,2001.

[4] 柴增田. 计算机技术与熔模精密铸造 [J]. 铸造纵横,2004(2):4-17.

[5] 蔡临宁,杨秉俭,苏俊义. 充填过程数值模拟技术的现状和发展[J]. 铸造技术,1996(3):30-34.

[6] 周建新. 铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势 [J]. 铸造,2012(10):1105-1106.

均衡凝固技术资料邮购

国家科技成果重点推广计划项目 编号:I-1-5-3
西安理工大学均衡凝固技术科研成果汇编

铸件充填与补缩工艺定量设计理论与实例

《铸件充填与补缩工艺定量设计理论与实例》是西安理工大学均衡凝固技术科研成果的汇编,被列为国家科技成果重点推广计划项目,编号 I-1-5-3。汇编共分 6 章:第一章 铸铁件均衡凝固与有限补缩。第二章 铸铁件冒口补缩设计。第三章 浇注系统当冒口补缩设计方法。第四章 浇注系统大孔出流理论与设计。第五章 铸钢 白口铸铁 铝钢合金铸件的均衡凝固工艺。第六章 铸件充填与补缩工艺定量设计实例。可用于铸件浇注系统,冒口补缩系统的定量设计,包括浇口、冒口的位置、大小、个数,冷铁的放置。也可用于对已有铸件浇口、冒口设计的定量评估,及对已产生的铸造缺陷的分析与防治。浇口、冒口的开设要防止几何热节、接触热节、流动热节的重合;在冒口颈处放冷铁消除冒口根缩孔、缩松缺陷;控制浇口截面比实现垂直分型等压等流量设计等技术,通过生产实例给予展现,可供生产应用参考。汇编邮购价 160 元。

联系地址:陕西省西安市碑林区友谊西路 127 号西北工业大学凝固楼三层

联 系 人:李巧凤 13991824906　QQ:53985132　E-mail:53985132@qq.com

李亚敏:15829361158　QQ:412008096　E-mail:412008096@qq.com

技术咨询:魏 兵 13609155628