

多功能显控台低压铸造工艺设计及优化

刘继广¹, 张雅咪¹, 方晓刚¹, 王殿飞¹, 杨友文¹, 吴中仁²

(1. 合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽合肥 230000; 2. 来安县茂兴精密机械制造有限公司, 安徽滁州 239236)

摘要: 多功能显控台是海军舰船电子装备中关键部件之一, 因其结构复杂、尺寸较大、且壁厚不均匀, 容易在铸造过程产生大面积缩松、缩孔缺陷。本文针对显控台铸件结构特点, 首先设计卧式和立式两种低压铸造浇注系统, 通过对比模拟结果发现, 相同工艺参数下立式浇注系统成形铸件缺陷更少。随后研究了浇注温度、充型时间和保压压力等工艺参数对铸件质量的影响规律, 并通过工艺模拟正交试验获得最优工艺参数(浇注温度为720 ℃, 充型时间为21 s, 保压压力为86 kPa)。最后, 通过进一步优化浇注方案, 即在厚大部分增加冒口进行补缩, 使整个铸件缩松、缩孔体积降低至0.33 cm³。

关键词: 显控台; 低压铸造; 数值模拟; 工艺优化

海军舰船电子装备承载着舰船作战、指挥、通讯等主要电子设备的综合集成功能^[1], 而多功能显控台是海军舰船电子装备中关键部件之一。舰载在航行过程中不可避免地会受到来自海浪、触礁、碰撞等引起的各种周期或非周期性干扰, 因此显控台服役环境对其铸件质量和性能要求较高^[2]。在实际生产中, 多功能显控台多采用砂型重力铸造工艺生产, 但其依靠金属液自重成形, 充型缓慢, 生产效率低, 且铸件容易出现大量的气孔、夹杂、缩松、缩孔等缺陷^[3-5]。

低压铸造是一种反重力铸造工艺, 通过在金属液面施加低压力, 使金属液沿反重力的方向充型。这不仅增强了金属液的流动性, 而且使铸件的补缩距离增加了^[6-9]。低压铸造的这一优势有效提高了铸件的成形质量, 减少裹气、冷隔和缩松、缩孔等缺陷的产生^[10-12]。刘国庆等^[13]针对大型铝合金薄壁筒形件结构特点设计了密排缝隙式低压铸造浇注系统, 并通过数值模拟方法分析了铸件充型和凝固过程, 从而确定了合理的工艺方案。李正选等^[14]研究了大型铝合金法兰的金属型低压铸造, 采用了金属型低压铸造工艺, 设计出了‘倒八’字浇口, 提高了铸件补缩能力, 实现了批量生产。然而, 对多功能显控台铸件这类大尺寸框架结构铸件的相关工艺模拟研究较少。

本文将针对多功能显控台铸件结构特点, 设计了两种不同的浇注工艺方案, 并通过分析比较选择最优的浇注工艺方案; 然后研究浇注温度、充型时间和保压压力等工艺参数对铸件质量的影响规律, 并结合模拟结果进一步优化浇注工艺方案。

1 工艺分析

1.1 多功能显控台铸件结构

多功能显控台铸件见图1, 该铸件轮廓尺寸为1 530 mm × 620 mm × 560 mm, 体积为48 700 cm³, 属于框架类大型铸件。该铸件上下两侧为大平面, 壁厚为12 mm, 左右两侧有多个通孔, 壁厚不均匀, 最小壁厚为10 mm, 最大壁厚为65 mm。铸件材质选用ZL104, 该合金的铸造性能好, 无热裂倾向, 但是温度降低快, 易氧化, 凝固体收缩率大。在填充凝固过程中, 容易出现紊流、夹杂、缩松、缩孔等缺陷, 对铸件的成形质量造成了严重的影响^[5]。因此, 需要低压铸造工艺实现平稳充型。

作者简介:

刘继广(1963-), 男, 教授, 研究方向为材料成形技术和装备研发。E-mail: jiguangliu@163.com

通讯作者:

方晓刚, 男, 讲师, 博士, E-mail: fangxg@hfut.edu.cn

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)12-1325-06

基金项目:

安徽省科技重大专项(18030901097); 材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题基金(P2019-024); 中央高校基本科研业务费专项资金(JZ2019HGTA0043、JZ2018HGBZ0133)资助。

收稿日期:

2020-08-24 收到初稿,

2020-09-03 收到修订稿。

1.2 低压铸造浇注工艺方案

由于框架类铸件的尺寸较大，金属液在铸件内部的流动通道长、汇流点多，因此采用多股横浇道分流，并用多个内浇道来缩短充型流程^[16]。由于低压铸造铝合金多采用开放底注式的浇注系统，因此本文设计了两种不同的浇注工艺方案，即卧式和立式浇注方案，如图2所示。图2a卧式浇注方案是将铸件横着充型，内浇道与框架四周边框相连，在铸件顶部分布着6个冒口；图2b立式浇注方案是将铸件竖着充型，浇注系统类似“工”字形，直浇道位于“工”字形浇注系统的中心线上，内浇道与铸件的底部相连。

表1是两种方案的浇注系统相关数值。由表1可看出，立式浇注系统各截面积均小于卧式的，立式浇注系统总体积约为卧式的二分之一，浇注系统体积的大小决定了工艺出品率的高低。减小浇注系统的体积，有利于提高铸件的工艺出品率和材料利用率，所以在工艺出品率方面，浇注方案比卧式的更好。

1.3 充型工艺参数设置

根据实际生产条件设定两种浇注方案的工艺参数：浇注温度为710℃，砂型铸型，型壳材料为树脂砂，铸型温度设置为20℃；升液阶段的压力为

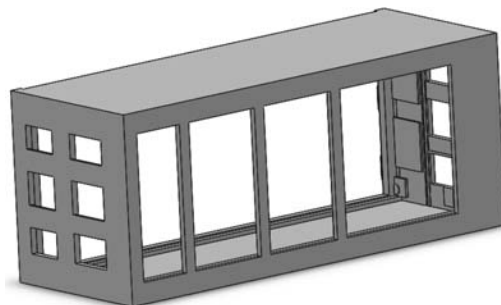


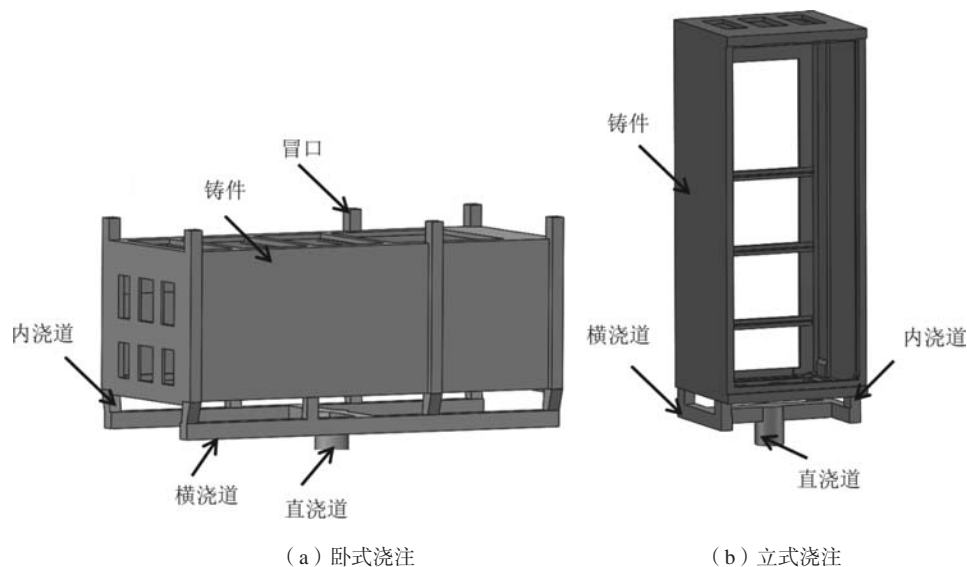
图1 铸件三维模型图

Fig. 1 3D model of display console casting

20 kPa，充型阶段压力为39 kPa，型腔充满后，保压阶段的压力为78 kPa。传热系数设置：铸件与砂型之间、砂型与空气的传热系数分别为300 W/(m²·K)和20 W/(m²·K)，设定室温为20℃。

1.4 两种方案数值模拟结果分析

Niyama判据常用于判断铸钢件或铸铝件缩松、缩孔缺陷位置。通过大量试验得到Niyama经验公式， $N = G/\sqrt{R}$ （ G 为温度梯度， R 为冷却速率）反映铸件内缩松、缩孔存在的可能性。若参数小于某个临界值时，则该单元将产生缩孔、缩松。凝固区判据值越小，缩松倾向越大，反之，缩松倾向越小。图3是两种



(a) 卧式浇注

(b) 立式浇注

图2 铸件浇注系统方案

Fig. 2 Two kinds of casting gating system

表1 不同方案浇注系统参数

Table 1 Process parameters of two kinds of gating system

浇注系统	$A_{内}$ 总截面积/cm ²	$A_{横}$ 总截面积/cm ²	$A_{直}$ 直径/cm	冒口体积/cm ³	总体积/cm ³
卧式	240	67.5	120	5 130	21 020
立式(初方案)	126	60	120	-	7 300
立式(优化方案)	123	60	120	4 800	12 100

方案铸件整体的Niyama判据分布图,因为Niyama判据有一定的误差,所以由图3可以初步预测,卧式方案3a在辅助浇道与铸件的连接处和横梁上出现缩松、缩孔的可能性很大;立式方案3b在铸件顶部产生缩松、缩孔的可能性很大。

图4a为卧式浇注方案的缩松、缩孔位置预测图。如图所示,大量的缩松、缩孔缺陷分布在铸件的两端和横梁上,四周的冒口并没有起到补缩作用,在铸件与冒口连接处存在缩松、缩孔缺陷。铸件的缩松、缩孔缺陷体积为 15.48 cm^3 。图4b为立式浇注方案的缩松、缩孔预测图,可以看出,相较于卧式浇注方案,立式的缩松、缩孔缺陷主要出现在铸件顶部厚大部分,四周和横梁上只存在少量的缩松、缩孔缺陷。缩松、缩孔缺陷体积为 7.69 cm^3 。在相同低压铸造工艺参数下,方案二立式浇注系统铸件缩松、缩孔体积约为方案一卧式浇注系统的二分之一。综上可知,在工艺出品率方面,立式浇注方案优于卧式浇注方案;在减少缩松、缩孔缺陷形成方面,立式浇注方案优于卧式浇注方案。所以,立式浇注方案更好。

2 工艺参数优化

2.1 工艺参数对铸件质量的影响

选择立式浇注方案做模拟正交实验。为了确定工艺参数对铸件质量的影响,在浇注温度、充型时间以及保压压力三个参数中,将其他两个参数设置为定值,分析单因变量对铸件缩松、缩孔缺陷的影响。

图5表示浇注温度对铸件质量的影响。ZL104合金的液相线温度为 $598\text{ }^\circ\text{C}$,浇注温度通常比合金液相线温度高 $80\sim 120\text{ }^\circ\text{C}$ 左右^[17],因此选择浇注温度在 $690\sim 730\text{ }^\circ\text{C}$ 。由图可以看出,随着浇注温度的上升,铸件整体的缩松、缩孔缺陷体积呈先降低再升高的趋势,其中浇注温度在 $710\text{ }^\circ\text{C}$ 时铸件整体缺陷体积最小,为 4.613 cm^3 ,铸件质量最好。

图6表示充型时间对铸件质量的影响。由图6可以看出,随着充型时间的增加,铸件的缩松缩孔缺陷整体趋势是逐渐减小的。

图7表示保压压力对铸件质量的影响。图中可以看出,随着保压压力的增大,铸件的缩松、缩孔在一定范围内呈减小趋势。但在实际生产当中,保压压力是影响铸件质量的一个主要的参数。实际生产中保压压力对铸件缩松缩孔的影响趋势通常为先增大后减小。

2.2 正交实验

为了研究不同因素对该铝合金铸件质量的影响,根据上述分析结果,设计了3因素3水平的正交实验,综合探讨浇注温度(A)、充型时间(B)和保压压力

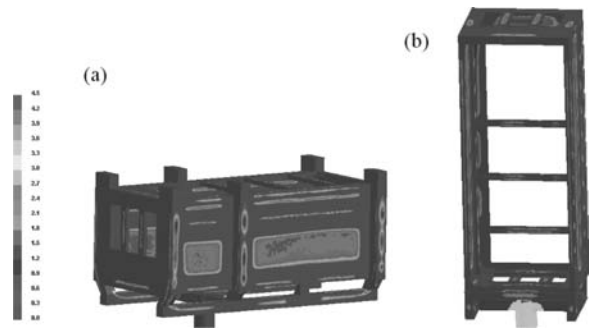


图3 Niyama判据分布图
Fig. 3 Distribution of Niyama criterion

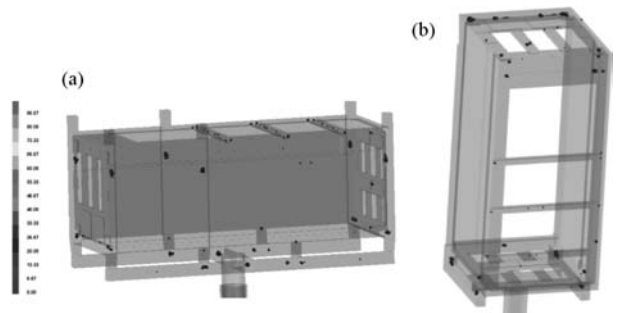


图4 缩松、缩孔位置预测图
Fig. 4 Position prediction of shrinkage cavity and porosity

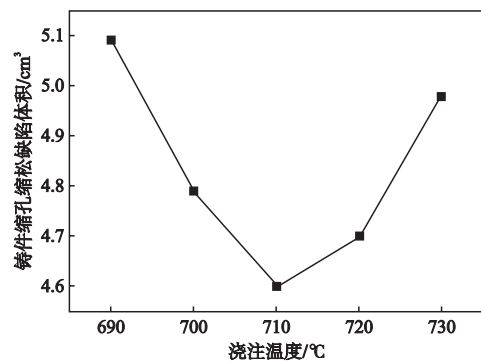


图5 浇注温度对铸件质量的影响
Fig. 5 Influence of pouring temperature on casting quality

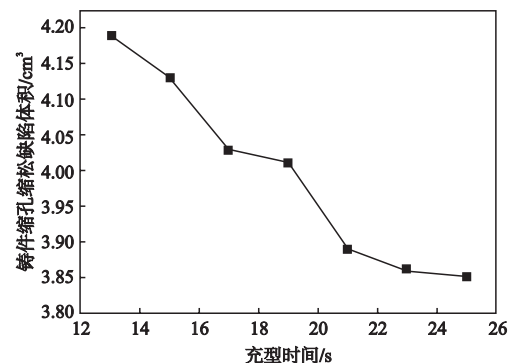


图6 充型时间对铸件质量的影响
Fig. 6 Influence of filling time on casting quality

(C)对铸件质量的影响。各工艺参数如表2所示。采用正交试验模拟其对多功能显控台低压铸造的影响,缩松、缩孔体积见表3。

由表3可知,浇注温度对铸件质量的影响最大,工艺参数的最优组合为 $A_3B_1C_3$,即浇注温度710℃,充型时间21s,保压压力86kPa时,铸件的缩松、缩孔体积最小,为 4.6917 cm^3 。

3 浇注工艺方案优化及验证

3.1 浇注工艺方案优化

由方案二的缩松、缩孔预测图可知,铸件的缩松、缩孔主要集中在铸件顶部厚大部分。因此,需要改进浇注方案,即在铸件顶部的四个顶角处各增加一个冒口,对铸件顶部厚大部分进行补缩,冒口尺寸为 $100\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,体积为 $4\ 800\text{ cm}^3$ (具体数值见表1)。铸件改进后的浇注方案如图8所示。

3.2 充型过程

选择最优工艺参数对改进后的浇注方案进行数值模拟。图9为铸件的充型过程。从模拟结果可以看出,当充满度为20%,金属液开始从内浇道流入铸件铸型内,自由液面处的温度约为720℃;在充满度为60%时,铸件整体温度在700℃左右,温度场分布均匀,金属液流动平稳,没有出现紊流;在充满度大于80%时,金属液缓慢上升,没有产生紊流,且温度场分布均匀,利于铸件自上而下顺序凝固;在充满度为100%时,铸件温度从上往下开始逐渐降低。在整个浇注过程中,金属液从下往上平稳充型,充型速度平缓,没有产生紊流。

3.3 模拟结果与验证

图10为改进方案采用最优工艺参数模拟的缩松、缩孔缺陷位置图。从模拟结果可以看出,铸件顶部的

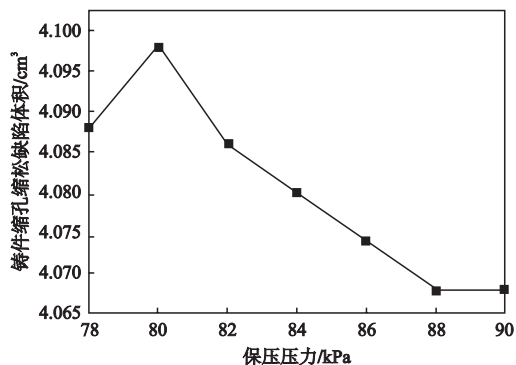


图7 保压压力对铸件质量的影响

Fig. 7 Influence of holding pressure on casting quality

表2 正交实验的因素水平设计

Table 2 Factor level design of orthogonal experiment

水平	A浇注温度/℃	B充型时间/s	C保压压力/kPa
1	700	21	82
2	710	23	84
3	720	25	86

表3 正交实验缩松、缩孔体积

Table 3 Volume of shrinkage cavity and porosity in orthogonal experiment

试验号	因素			评价指标
	A浇注温度/℃	B充型时间/s	C保压压力/kPa	铸件缺陷体积/cm³
1	700	21	82	4.819 4
2	700	23	84	4.907 1
3	700	25	86	4.925 6
4	710	21	84	4.856 3
5	710	23	86	4.810 0
6	710	25	82	4.823 4
7	720	21	86	4.691 7
8	720	23	82	4.819 8
9	720	25	84	4.783 7
K_1	14.652 1	14.367 4	14.462 5	
K_2	14.489 7	14.536 9	14.547 1	
K_3	14.295 2	14.532 7	14.427 3	
k_1	4.884 0	4.789 1	4.820 9	
k_2	4.829 9	4.845 6	4.849 0	
k_3	4.765 1	4.844 2	4.809 1	
极差R	0.118 9	0.056 5	0.039 9	
主次顺序	A>B>C			
优水平	A_3	B_1	C_3	
优组合	$A_3B_1C_3$			

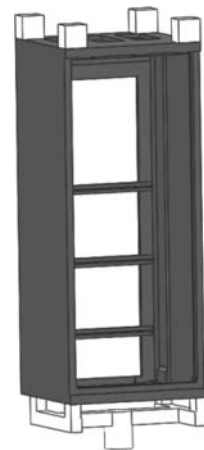


图8 改进后铸造工艺方案

Fig. 8 Improved casting process

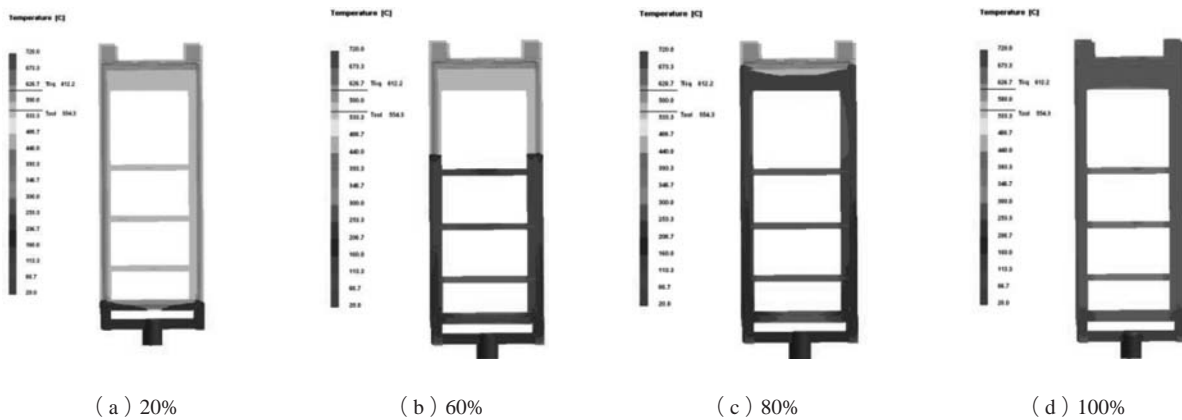


图9 铸件的充型过程
Fig. 9 Filling process of casting

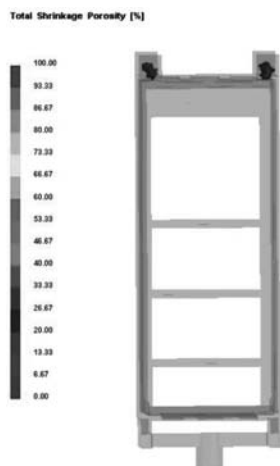


图10 优化方案缩松、缩孔缺陷图
Fig. 10 Predication of shrinkage cavity and porosity defects



图11 优化方案的铸件图
Fig. 11 Produced casting using improved casting process

冒口进行了有效的补缩，消除了铸件顶部的缩松、缩孔缺陷，缩松、缩孔体积减小到了 0.33 cm^3 。该方案获得的实际显控台铸件如图11所示，经过检测与缺陷分析，铸件本体无明显缩孔缩松缺陷，与模拟结果一致。因此本工艺方案设计合理，产品合格率高，适合进行实际生产。

4 结论

(1) 根据显控台铸件本身的结构特点，设计了卧式和立式两种低压铸造浇注方案，并使用Procast软件

对铸件的两种方案进行了模拟和分析，发现立式浇注系统更为合理。

(2) 研究了浇注温度、充型时间、保压压力低压铸造工艺参数对铸件质量的影响规律，并通过正交试验得到最优工艺参数为：浇注温度 $720 \text{ }^\circ\text{C}$ 、充型时间 21 s 、保压压力 86 kPa 。

(3) 通过在铸件顶部加冒口进一步改进了浇注工艺方案，有效地减少了缩松、缩孔等铸造缺陷的产生，使缩松、缩孔体积降低至 0.33 cm^3 ，铸件质量明显提高。

参考文献:

- [1] 顾金良, 李敬东. 舰艇多功能显控台的未来发展展望 [J]. 仪表技术, 2011 (11): 60-63.
- [2] 许建平, 曹宁生. 国外舰艇多功能显控台的现状和发展趋势 [J]. 舰船电子工程, 2008, 28 (7): 1-3.
- [3] 金俊尉. 横梁倒挂式激光切割机的结构优化设计 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [4] 冯志军, 孙学敏, 马春江. 大型薄壁铝合金箱体的铸造工艺 [J]. 铸造, 1995 (9): 23-25.
- [5] 罗传彪, 杜旭初, 樊振中, 等. 铸造工艺对ZL114A 铝合金铸件性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (6): 652-656.

- [6] 廖可, 舒惠明, 万慧, 等. 低压铸造在大型复杂薄壁结构铝合金铸件的工艺研究 [J]. 科技创新与应用, 2017 (30): 78-81.
- [7] 刘宏磊, 李昌海, 王英峰. 铝合金车轮低压铸造充型工艺设计 [J]. 精密成形工程, 2017, 9 (2): 91-94.
- [8] 邱克强, 王磊, 刘彬, 等. 镁合金汽车轮毂低压铸造数值模拟 [J]. 铸造, 2011, 60 (12): 1214-1221.
- [9] 郎霄, 李海兰, 孙逊, 等. 压力对ZCuZn16Si4合金补缩特性的影响 [J]. 铸造, 2009, 58 (10): 1063-1065.
- [10] 王剑, 王云峰, 董传成, 等. 重力铸造及低压铸造活塞显微组织与性能对比 [J]. 金属加工, 2018 (7): 86-87.
- [11] 常涛. 低压铸造ZL205A合金界面换热系数的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [12] 王晔. ZL205A 筒形件低压铸造宏观偏析形成机制及补缩行为 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [13] 刘国庆, 隋大山, 解国宏, 等. 大型铝合金薄壁筒形件低压铸造工艺的数值模拟 [J]. 铸造技术, 2019, 48 (9): 74-78.
- [14] 李正选, 奚旭, 谢淳, 等. 大型铝合金法兰的金属型低压铸造 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34 (7): 723-725.
- [15] 柳百成, 黄天佑. 铸造成形工艺手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [16] 姜不居, 吕志刚. 铸造技术应用手册第5卷: 特种铸造 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [17] 文博. 基于增材制造的复杂零件快速铸造工艺与数值模拟研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2018.

Design and Optimization of Low-Pressure Casting Process for Multi-Function Display Console

LIU Ji-guang¹, ZHANG Ya-mi¹, FANG Xiao-gang¹, WANG Dian-fei¹, YANG You-wen¹, WU Zhong-tian²

(1. College of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230000, Anhui, China; 2. Lai'an Maoxing Precision Machinery Manufacturing Co., Ltd., Chuzhou 239236, Anhui, China)

Abstract:

Multi-function display console is a key part of naval ship electronic equipment. Due to its complex structure, large size and uneven wall thickness, it is easy to produce large area shrinkage cavity and porosity defects in the casting process. In this study, two kinds of low-pressure casting pouring system, horizontal and vertical, were designed according to the structural characteristics of the display control table castings. By comparing the simulation results, it was found that the casting defects formed in the vertical pouring system were less under the same process parameters. Subsequently, the effects of low-pressure casting process parameters, such as pouring temperature, filling time and holding pressure, on the casting quality were studied. By means of the orthogonal experiment simulation, the optimal technological parameters were determined as follows: the pouring temperature was 720 °C, the filling time was 21 s, and the holding pressure was 86 kPa. With the addition of riser to the thick parts of casting, the casting process was further optimized, and the volume of shrinkage cavity and porosity was reduced to 0.33 cm³.

Key words:

display console; low-pressure casting; numerical simulation; process parameter optimization