

熔模铸造新型镍铝青铜合金阀体

杨芬芬¹ 李振彦¹ 宋祥阳² 陈君逸¹ 潘 源¹
(1.遵义师范学院工学院; 2.大连船用阀门有限公司)

摘 要 为验证新型镍铝青铜合金应用于阀体生产的可行性,采用熔模铸造工艺,模拟分析了阀体铸件的凝固过程,针对原始模拟方案产生的缩孔、缩松及冷隔等缺陷,进行了铸造工艺方案优化。结果表明,采用立式放置、阶梯式浇注方式,并在最厚位置处增加补缩通道,可消除阀体铸件的缩孔、缩松及冷隔等缺陷。经试制生产验证,浇注后的铸件表面品质良好。X 射线探伤结果表明铸件内部无缩孔、缩松及冷隔等缺陷,获得了优质阀体铸件。

关键词 阀体;熔模铸造;模拟分析;工艺优化;缩孔缩松

中图分类号 TG249.5;TG146.1⁺1 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Investment Casting Novel Ni-Al Bronze Alloy Valve Body

Yang Fenfen¹, Li Zhenyan¹, Song Xiangyang², Chen Junyi¹, Pan Yuan¹

(1.College of Engineering and Technology, Zunyi Normal University; 2.Dalian Marine Valve Co., Ltd.)

Abstract: In order to verify the application feasibility of novel nickel-aluminum bronze alloy to the valve body production, solidification process of investment casting valve body casting was simulated and analyzed by numerical software, and the initial casting process scheme was optimized according to the analysis of shrinkage porosity and cold shut. The results indicate that the shrinkage porosity and cold shut defects can be eliminated thoroughly when vertical placement and step gating system are adopted, and feeding channels are added in the thickest location. The simulation results were verified by trial production, and results reveal that the surface quality of valve body casting is satisfied. X-ray detection results demonstrate that absence of casting defects such as shrinkage porosity and cold shut is found in the valve body, and valve body casting with high quality can be produced.

Key Words: Valve Body, Investment Casting, Simulation Analysis, Process Optimization, Shrinkage Porosity

金属材料常因腐蚀造成巨大经济损失,2018 年全球腐蚀损失为 3~4 万亿美元^[1-2]。随着海洋开发的不断发展,我国提出了加快建设海洋强国及建设海上丝绸之路等战略目标^[3-4],对金属材料的耐海水腐蚀性能提出了更高的要求。前期对现有镍铝青铜合金(NAB)进行了系统的成分优化研究,开发出了一种新型 NAB 合金(CuAl9Ni8Fe4Mn1.2),与现有 NAB 合金相比,新型 NAB 合金的力学性能和耐腐蚀性能都得到了显著提高:屈服强度和硬度(HV)分别提高了 11.8% 和 3.8%;耐静态腐蚀性能提高了约 30%^[5];耐局部腐蚀性能提高了约 50%,耐流动腐蚀性能提高了约 20%^[5-6]。

目前,阀体铸件材料多采用锡青铜,其是凝固时体积收缩最小的铜合金之一^[7],铸造工艺性能良好。镍铝

青铜合金与锡青铜相比,具有更加优异的耐腐蚀性能,特别是耐流动海水腐蚀性能^[8-10],但其在铸造过程中的体收缩倾向很大,极易产生缩孔缺陷^[11]。采用的新型 NAB 合金由于 Ni 含量较高,合金熔点随之上升,进一步加大了铸造过程产生收缩的倾向。高浩斐等^[12]通过设计顶注式浇注系统,结合在法兰顶部设置梯形冒口的方式,有效消除了阀体铸件在熔模铸造过程中的缩孔、缩松缺陷。杨小建等^[13]通过设计联合式浇注系统,实现了铸件的顺序凝固,使缩孔、缩松最终分布于浇冒口中。谭培松^[14]通过对三通阀体增加补缩筋的方式,有效解决了厚大部位出现的缩孔、缩松的问题。本研究对新型 NAB 合金阀体熔模铸造的凝固过程进行模拟分析,对阀体铸造工艺方案进行优化,以消除缩孔、缩松等缺陷,确定最佳工艺方案。

收稿日期:2022-08-17;修改稿收到日期:2022-10-08
基金项目:国家自然科学基金项目资助(52101062);贵州省省级科技计划资助项目(黔科合基础-ZK[2021]一般 239);遵义市科技计划资助项目(遵市科合 HZ 字(2021)203 号);遵义师范学院博士基金资助项目(遵师 BS[2020]6 号)
第一作者简介:杨芬芬,女,1988 年出生,讲师,贵州遵义(563006),E-mail:yangfen0515@163.com
通信作者:李振彦,男,1985 年出生,讲师,贵州遵义(563006),E-mail:lizhenyan888@163.com
引用格式:杨芬芬,李振彦,宋祥阳,等. 熔模铸造新型镍铝青铜合金阀体[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):704-709.
YANG F F, LI Z Y, SONG X Y, et al. Investment casting novel Ni-Al bronze alloy valve body[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):704-709.

1 阀体结构及熔模铸造模拟工艺

1.1 阀体结构分析

阀体铸件三维模型见图1,其轮廓尺寸为 $\phi 80\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。阀体结构复杂、壁厚不均,其中阀体两端的法兰 T 处厚度为 9 mm , R 处最大厚度为 12 mm ,而球形结构 S 处的最小壁厚仅为 3 mm 。铸件表面及内部不得存在缩孔、缩松、冷隔和浇不足等缺陷。

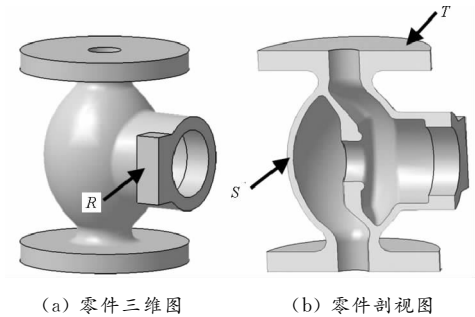


图 1 铸件三维模型
Fig.1 3D model of valve body

1.2 阀体铸件材料

截止阀阀体铸件材质为新型 NAB 合金,采用 X 射线荧光光谱仪(XRF-1800)进行成分分析,化学成分见表 1。

表 1 新型 NAB 合金的化学成分

成分	w _B				
	Al	Ni	Fe	Mn	Cu
名义	9.00	8.00	4.00	1.20	余量
实测	9.84	7.88	3.96	1.17	余量

1.3 模拟参数设置

阀体采用熔模铸造,型壳初始预热温度为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$;铸件与型壳之间的传热系数为 $500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ^[15],浇注温度为 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。浇注完成后铸件在砂箱中缓冷,铸件凝固收缩率为 1.5% 。

2 初始模拟方案

2.1 浇注系统设计

由于阀体两端的法兰面和 R 处端面为加工面,将阀体铸件卧式放置,使法兰面呈直立状态,使 R 处端面朝下,以避免加工面上出现气孔及夹渣等缺陷^[16]。采用底注式浇注,内浇道与阀体厚大部位 R 处相连,以保证厚大部位最后凝固并及时实现补缩。阀体铸件的浇注系统三维图和网格模型见图 2,其中铸型有限元网格大小为 3 mm ,铸型面网格数为 $38\,854$,体网格数为 $320\,640$ 。

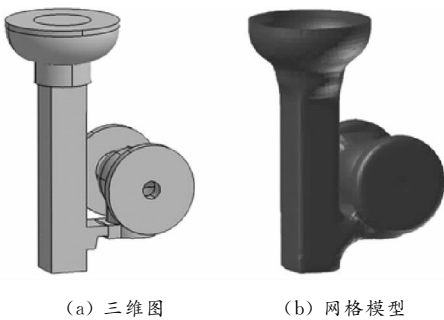


图 2 初始浇注系统模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of initial scheme model

2.2 凝固过程分析

为了更好地观察铸件的凝固顺序和孤立液相区的位置,采用固相场进行分析^[13,17]。图 3 为铸件凝固过程的固相场分布。从图 3a 看出,当凝固时间为 22.90 s 时, S 处率先凝固,此时铸件固相率为 8.8% 。从图 3b 可知,当凝固时间为 72.90 s 时,铸件固相率达到 23.3% 。从图 3c 看出,当凝固时间为 122.90 s 时, S 处已完全凝固,阀体两端法兰由于较为厚大,尚未完全凝固,此时铸件固相率为 30.9% 。由图 3d~图 3f 可知,铸件先凝固,浇注系统后凝固,凝固顺序合理,可实现对阀体及时补缩。



图 3 初始方案铸件凝固过程的固相分布

Fig.3 Solid phase field distribution during solidification process

2.3 铸造缺陷位置分布

图 4 为模拟铸造缺陷的位置分布。可以看出,阀体

铸件内部出现了严重的缩孔、缩松与冷隔缺陷,主要分布在 S 和 T 处。由于 S 处壁厚仅为 3 mm ,最先凝固,

且处于水平位置,熔体流动缓慢,而在铸型的激冷作用下凝固速度较快,容易产生冷隔。由图 3c 可知,由于 T 处较为厚大,当中间球形薄壁结构已完全凝固时, T 处尚未完全凝固, T 处的凝固收缩由于中部补缩通道封闭而无法得到补缩,因此在凝固结束后出现了缩孔、缩松。铸件下方厚大部位 R 处(厚 12 mm)与浇道连通,其凝固收缩可以得到浇注系统的及时补缩,因此,虽然 R 处比两端法兰 T 处壁厚更大, R 处的缩孔、缩松体积较小。

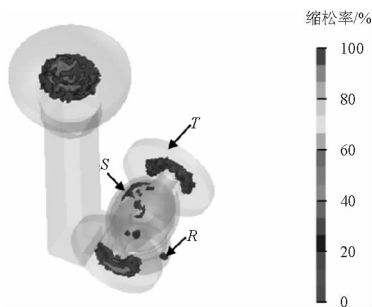


图 4 初始方案缩孔、缩松缺陷位置分布

Fig.4 Distribution of shrinkage cavities and porosities

3 模拟方案优化

3.1 浇注系统优化设计

针对初始模拟方案出现的缩孔、缩松及冷隔等铸造缺陷,改变铸件的浇注位置,由卧式改为立式,改善铸件

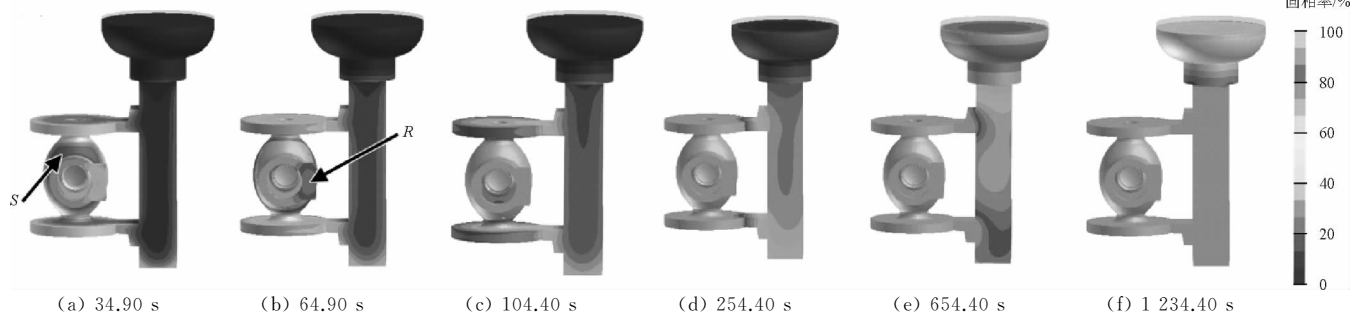


图 6 优化方案铸件凝固过程的固相率分布

Fig.6 Solid fraction distribution during solidification process

固较慢,仍处于液固两相区,如果无法及时得到补缩,容易产生缩孔、缩松,见图 6b。在 104.40 s 时, S 处已完全凝固,此时固相率为 28.8%,两端处的厚大法兰仍未完全凝固,但是浇注系统可以对两个法兰进行实时补缩,见图 6c。在 254.40 s 时,两个法兰趋于完全凝固,浇注系统仍然可以对法兰边缘部位进行及时补缩,此时铸件整体固相率为 41.5%,见图 6d。从图 6e 和图 6f 可知,阀体部位已完全凝固,浇注系统和冒口最后凝固,表明该浇注系统设计合理。

优化方案实现了顺序凝固,但 R 处由于凝固较慢,而薄壁球形结构处凝固较快,阻塞了 R 处的补缩通道,使 R 处容易产生缩孔、缩松缺陷。

中部薄壁球形结构处的熔体流动情况,避免出现冷隔缺陷;并采用阶梯式浇注,内浇道与阀体铸件两端法兰相连,以实现两端厚大法兰的补缩,避免法兰处出现严重缩孔、缩松缺陷。阀体铸件的浇注系统和型壳见图 5,其中铸型有限元网格大小为 2 mm,铸型面网格数为 73 492,体网格数为 719 290。

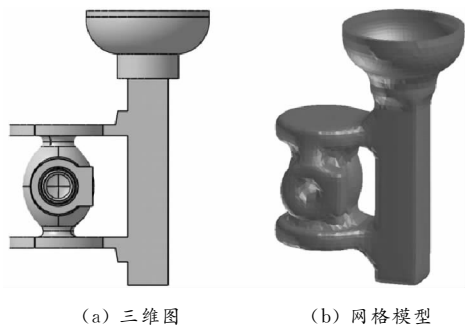


图 5 优化后的浇注系统方案

Fig.5 The optimized scheme

3.2 凝固过程分析

3.2.1 整体凝固过程分析

对铸件整体凝固过程进行分析,见图 6。可以看出,在 34.90 s 时,液态金属充满型腔,在型壳的激冷作用下开始凝固, S 处由于壁厚较薄,冷却较快,此时固相率为 13.2%。在 64.90 s 时,温度进一步降低,球形薄壁处已接近凝固尾声,此时固相率达到 21.7%,但 R 处凝

3.2.2 厚大部位截面凝固过程分析

截取厚大部位 R 处截面进行进一步分析,截面位置见图 7。厚大部位处截面的凝固过程演变见图 8。可

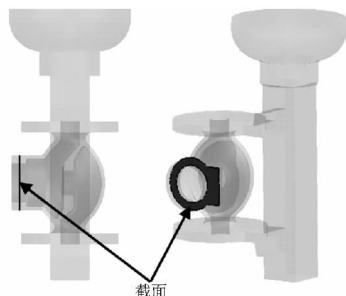


图 7 优化方案铸件分析截面位置

Fig.7 Section position for casting analysis



图 8 优化方案铸件 R 位置处截面凝固过程
Fig.8 Solidification process of section at R position

以看出,随着铸件凝固过程的进行,该截面上左侧圆弧区由于壁厚较薄,率先开始凝固,右侧厚大矩形区凝固较慢。在 54.90~64.40 s 时,由于周围补缩通道封闭,矩形区内部形成孤立液相区,在后期凝固过程中得不到及时补缩,此处有产生缩孔、缩松倾向。

3.3 铸造缺陷位置分布

优化后方案的模拟铸造缺陷位置分布见图 9。可以看出,与初始模拟方案相比,阀体铸件内部的缩孔、缩分布区域与体积都显著减小。经优化后,铸件的缩孔、缩松主要分布在厚大位置 R 处,其余分布在直浇道与冒口内部,铸造缺陷位置分布与上述凝固过程分析结果一致(见图 7 与图 8)。

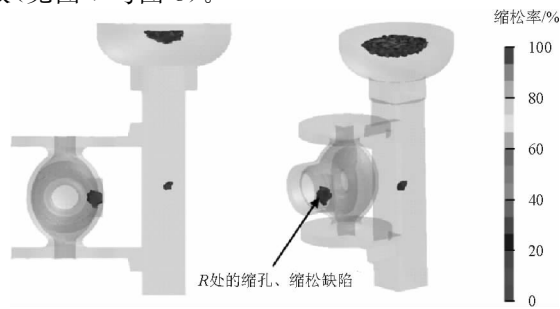


图 9 优化方案缩孔、缩松缺陷位置分布
Fig.9 Distribution of shrinkage cavities and porosities

4 优化方案局部改进

4.1 浇注系统优化设计

针对优化工艺方案中 R 处的缩孔、缩松,在浇注系统中增加 R 位置与法兰、冒口之间的连接通道,实现补

缩和排气功能,从而消除厚大部位 R 处的缩孔、缩松,优化后的浇注系统见图 10。

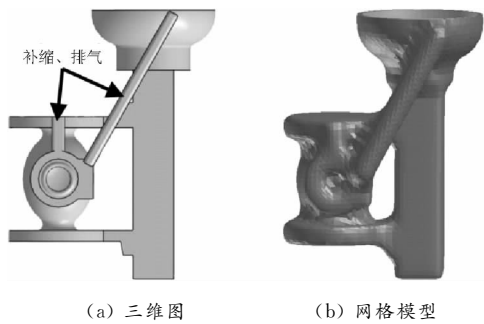


图 10 增加补缩通道的浇注系统
Fig.10 The optimized scheme with feeding channel

4.2 凝固过程分析

针对容易出现缩孔、缩松缺陷的 R 处,截取同时包含补缩通道的截面进行凝固过程观察分析,截面位置见图 11。对截面的凝固过程进行分析,其固相率的时间演变见图 12。当凝固时间为 58~78s 时,除厚大部位

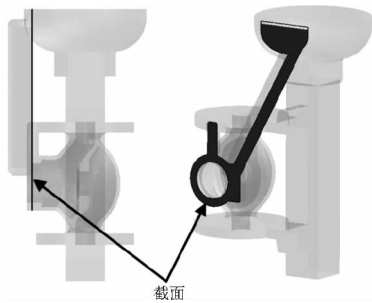


图 11 局部改进方案分析截面位置
Fig.11 Selected section position

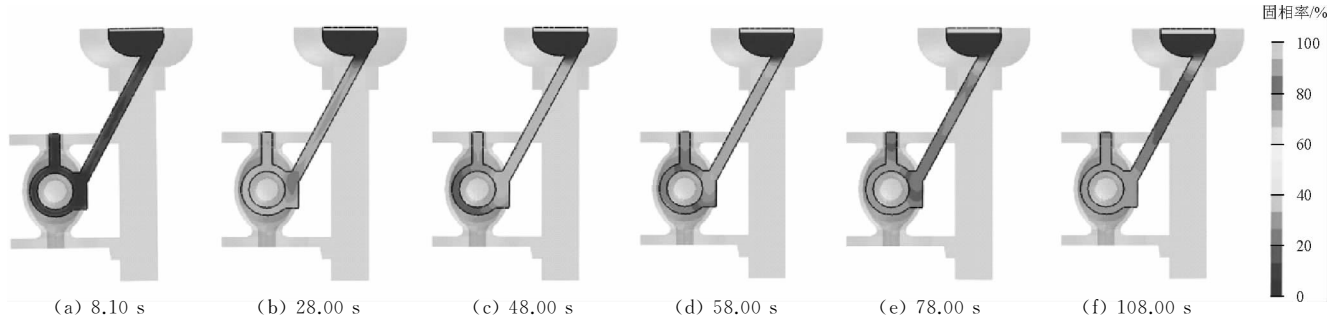


图 12 局部改进方案分析截面凝固过程
Fig.12 Solidification process of selected section

R 处以外, 阀体其他部位已经完全凝固, 由于 R 处与法兰和冒口连通, 在其后期凝固过程中发生的收缩可以由两个补缩通道及时补缩, 避免 R 处出现孤立液相区, 实现了铸件先凝固、补缩通道后凝固, 从而可避免 R 处产生缩孔、缩松。

4.3 铸造缺陷位置分布

优化后方案的模拟铸造缺陷位置分布见图 13。通过增大对 R 处的补缩通道, 实现了厚大部位先凝固、浇冒口及补缩通道后凝固, 缩孔、缩松全部分布于浇冒口中, 消除了阀体铸件内部的缩孔、缩松及冷隔缺陷。

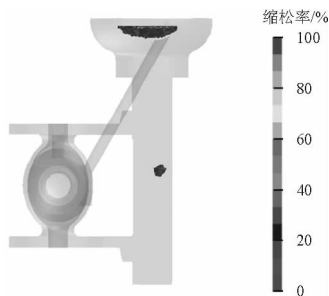


图 13 局部改进方案缩孔、缩松缺陷位置分布
Fig.13 Distribution of shrinkage cavities and porosities

5 生产试制

5.1 熔模铸造准备与生产

采用新型 NAB 合金, 按优化后工艺方案进行熔模铸造试制。试制过程中所采用的蜡模、型壳以及带浇注系统的铸件见图 14。蜡模采用低温蜡成型, 压蜡温度为 45~50 ℃, 压蜡压力为 0.4~0.5 MPa。型壳采用硅溶胶与水玻璃复合工艺, 其中表面层涂料采用硅溶胶与锆英粉混合制成, 流杯粘度为 36~40 s, 撒 60~80 目莫来砂; 二层涂料采用硅溶胶与莫来粉混合制成, 流杯粘度为 18~22 s, 撒 30~60 目莫来砂; 3~7 层涂料采用水玻璃粘结剂与莫来粉混合制成, 水玻璃密度为 1.28~1.30 g/cm³, 第 3 层的流杯粘度为 8~10 s, 3 层以后的流杯粘度为 28~30 s, 撒 16~30 目莫来砂。型壳制备完成并停放 12~24 h 后脱蜡, 型壳脱蜡后自然干燥 24



图 14 阀体铸件的生产过程
Fig.14 Casting process of valve body

h 以上再焙烧, 焙烧温度为 950~1 000 ℃, 并保温 0.5~1 h。采用真空中频熔炼炉进行熔炼, 浇注温度为 1 200 ℃, 浇注后得到的铸件见图 14c。

5.2 铸件加工和 X 射线探伤

铸件冷却后, 去除型壳, 并切除浇注系统, 进行机加工, 加工后的阀体见图 15。可以看出, 铸件轮廓及表层字迹清晰, 无缩孔、缩松、气孔及裂纹等铸造缺陷。采用 X 射线 (COMET MXR-451HP/11) 对阀体内部进行探伤, 阀体零件内部无缩孔、缩松、冷隔和气孔等缺陷, 与模拟结果一致。

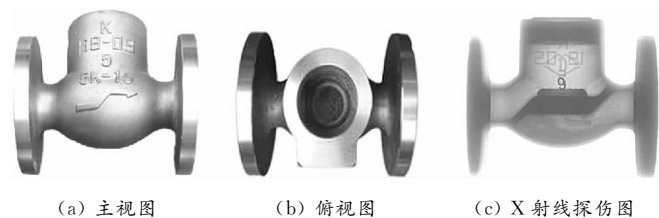


图 15 机加工后的阀体和探伤结果
Fig.15 Machined valve and inspection results

6 结 论

(1)对精密铸造新型镍铝青铜合金阀体的工艺进行优化, 将铸件的浇注位置由卧式改为立式, 采用阶梯式浇注实现对两端法兰处的及时补缩, 有效消除了铸件中部薄壁球形结构处及两端法兰位置处的缩孔、缩松, 但是最厚位置处由于未得到及时补缩, 仍存在集中缩孔缺陷。

(2)对精密铸造新型镍铝青铜合金阀体优化方案进行局部改进, 在最厚位置处增加补缩通道, 模拟和试制结果表明阀体铸件内部的缩孔、缩松和冷隔等缺陷全部消除。

参 考 文 献

- [1] 赵鹏雄, 武玮, 淡勇. 空间分辨技术在金属腐蚀原位监测中的应用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(6): 495-507.
- [2] 胡桦倩. 海洋环境中金属的腐蚀及防护研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(3): 166-167.
- [3] 金永明. 新时代中国海洋强国战略治理体系论纲[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2019(5): 22-30.
- [4] 陈国东, 张帆, 刘智勇, 等. 金属材料在三亚海水中的腐蚀电位序及合金成分对耐蚀性的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(9): 99-109.
- [5] YANG F F, KANG H J, GUO E Y, et al. The role of nickel in mechanical performance and corrosion behaviour of nickel-aluminium bronze in 3.5% NaCl solution[J]. Corrosion Science, 2018, 139: 333-345.
- [6] YANG F F, KANG H J, CHEN Z N, et al. Electrochemical corrosion mechanisms of nickel-aluminium bronze with different nickel contents using the rotating disc electrode[J]. Corrosion Science, 2019, 157: 438-449.

航天用镁合金壳体铸件合格率提升与稳定性控制

刘颖卓 张 娜 潘 龙 邹文兵
(上海航天精密机械研究所)

摘 要 通过分析,查找影响航天用镁合金壳体铸件合格率的主要原因,并开展相关研究。制定一些列措施,包括优化树脂砂的组分。增加冷铁宽度等,保证铸件了合格率提升及生产过程稳定。

关键词 航天;镁合金壳体;铸造;PFMEA

中图分类号 TG146.22 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.024 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Qualification Rate Improvement and Stability Control of Magnesium Alloy Shell Castings for Aerospace

Liu Yingzhuo, Zhang Na, Pan Long, Zou Wenbing
(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute)

Abstract: The main reasons affecting the qualification rate of magnesium alloy shell castings for aerospace were analyzed, and relevant investigation was carried out. Some measures were adopted, such as optimization of resin constituent, increasing the cold iron width, to ensure the improvement of qualification rate of castings and stability of production process.

Key Words: Aerospace, Magnesium Alloy Shell, Casting, PFMEA

航天产品制造过程工艺复杂、精度要求高,为保证航天产品性能和品质、缩短研制周期、降低制造成本、提高产品可靠性,需不断提升产品合格率,稳定控制其生产过程^[1]。尽管铸造过程十分复杂,因素多变,很难避免缺陷的产生,但近年来热工界还是提出“向近无缺陷方向发展”的目标^[2]。该镁合金壳体铸件是某型号航天用导弹弹体结构部件,其内部品质等指标对最终产品极

其关键。因此,针对其缺陷问题的分析和解决,具有积极的意义。

1 产品及存在的缺陷

航天用镁合金壳体采用 ZM5 铸造镁合金,长度为 600 mm,端框直径为 400 mm,薄壁处壁厚为 12 mm,使用粘土砂反重力铸造成形,铸件结构示意图见图 1。

收稿日期:2022-08-12;**修改稿收到日期:**2022-09-28
第一作者简介:刘颖卓,男,1987 年出生,高级工程师,上海(201600),E-mail:15221009513@163.com
引用格式:刘颖卓,张娜,潘龙,等. 航天用镁合金壳体铸件合格率提升与稳定性控制[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):709-711.
LIU Y Z, ZHANG N, PAN L, et al. Qualification rate improvement and stability control of magnesium alloy shell castings for aerospace[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):709-711.

[7] 路俊攀,李湘海.加工铜及铜合金金相图谱[M].长沙:中南大学出版社,2010.

[8] ZHANG B B, WANG J Z, YAN F Y. Load-dependent tribocorrosion behaviour of nickel-aluminium bronze in artificial seawater[J]. Corrosion Science, 2018, 131: 252-263.

[9] QIN Z B, XIA D H, ZHANG Y W, et al. Microstructure modification and improving corrosion resistance of laser surface quenched nickel-aluminum bronze alloy[J]. Corrosion Science, 2020, 174: 108 744.

[10] RIVERO P J, BERLANGA C, PALACIO J F, et al. Effect of Ti on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of a nickel-aluminum bronze alloy[J]. Materials Research, 2021, 24 (2): 1-9.

[11] 徐健,邢建东,李镜银. 镍铝青铜的熔铸工艺特点[J].材料开发与应

[12] 高浩斐,屈银虎,钟涛,等.基于 ProCAST 的阀体零件熔模铸造艺优化[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 657-660.

[13] 杨小建,张怀章,杨国超,等.喷嘴本体的熔模铸造工艺及模拟计算[J].热加工工艺, 2021, 50(7): 66-68.

[14] 谭培松.熔模铸造中缩孔、缩松的几种解决方法[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(7): 744-747.

[15] 张国强,赵占西,顾君捷,等. 缸体消失模铸造数值模拟与工艺优化[J].特种铸造及有色合金, 2019, 39(1): 63-66.

[16] 黄天佑.材料加工工艺[M].北京:清华大学出版社, 2010.

[17] 夏琨,徐向阳,段士伟. 基于 ProCAST 的转子盘熔模铸造数值模拟研究[J].铸造技术, 2022, 43(5): 7-10.

(编辑:刘卫)