

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.

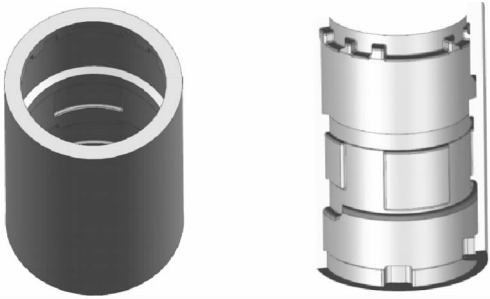
[14] 谭培松.熔模铸造中缩孔、缩松的几种解决方法[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(7): 744-747.

[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)



(a) 三维图 (b) 剖分图

图 1 镁合金壳体铸件结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of magnesium alloy shell structure

该壳体铸件应满足主要包括化学成分、力学性能、铸件尺寸和内部品质等方面要求。其中,铸件内部品质应经 X 射线检测。对于铸件内部存在的缩松等缺陷,前后端框、舵框与后滑块连接部位按二级验收,其余按三级验收,铸件内部不允许出现熔剂夹渣和裂纹等缺陷。

采用粘土砂手工造型、反重力自动浇注工艺,铸件结构虽然比较规则,但壁厚差别较大,不利于铸造成形。

同时受手工造型影响,粘土砂性能不稳定,凝固温度场难以控制,产品稳定性差,容易产生缩松等铸造缺陷。

采用粘土砂手工造型工艺生产的镁合金壳体铸件,近 3 年合格率为 65%,合格率最高水平也仅为 72%,铸造合格率相对较低,生产过程稳定性差。

2 原因分析及目标设定

通过对近 3 年镁合金壳体铸件报废原因进行统计,发现主要报废原因为铸件内部缩松缺陷超标,占比约为 96%。潜在失效模式及后果分析是极其重要的缺陷预防技术,应用以识别并帮助最大程度地减少潜在的隐患^[3]。按照镁合金壳体铸件铸造生产全链路,采用 PFMEA 方法,即过程潜在失效模式及影响分析,进行全工序分析,见表 1,以识别各工序工艺故障模式、故障影响和故障原因。通过对风险优序数进行计算,识别影响产品合格率和稳定性的关键因素和薄弱环节,重点关注影响产品关键特性或问题指标实现的关键工序。根据风险优序数 RPN 值,造型制芯工序最大,为 12,为薄

表 1 PFMEA 工作表
Tab.1 PFMEA workshop

工序号	工序名称	工艺功能/要求	故障模式	故障原因	故障影响	故障检测方法	严酷度 SN	发生度 ON	检测度 DN	风险优序数 RPN
10	检查	模具、芯盒齐全,外观完好,无变形、碰伤	铸件尺寸超差	模具不合格,检验未检出	铸件让步接收或报废	目视	1	1	1	1
.										
40	造型制芯	型腔应完整,冷铁、激冷砂、过滤网等放置到位,表面烘烤干燥,合箱等待时间不超过规定时间	产品落砂、气孔、缩松、缩孔等缺陷	冷铁、石墨砂放置不到位、表面烘烤不干燥,合箱等待时间过长	表面缺陷可以打磨处理,缺陷严重可能报废	目视	3	2	2	12
.										
170	入库	汇集并整理相关报告,办理产品入库	铸件不能合格入库	检验员未按要求整理报告,报告不全	铸件无法合格入库	目视	1	1	1	1

弱环节和风险较大工序,故障模式为缩松缺陷。
目前采用的粘土砂手工造型方法经过多次迭代改进已较为成熟,继续使用该方法很难减少缩松缺陷。树脂砂造型可以通过树脂和固化剂的反应实现型砂的粘接,避免了造型时人工操作对型砂紧固不均匀产生的一系列问题,设定铸件合格率提升至 85% 以上的目标值。

3 解决措施

3.1 树脂砂工艺控制

通过开展树脂砂型砂强度、透气性、发气量、耐热时间、阻燃等工艺性能试验,确认较为理想的树脂砂型砂配比为:树脂双组分各为 0.6%、阻燃剂为 1.2%,其余为石英砂。此时形成的树脂砂强度大于 0.7 MPa,透气性大于 250,发气量小于 12 mL/g,耐热时间大于 12 s,试

样表面氧化膜较完整,无明显烧斑。

3.2 铸造工艺设计及仿真优化

含浇注系统的铸件模型见图 2,采用 4 立筒底注式,冷铁分布于浇口前及铸件厚壁处。



图 2 含浇注系统的铸件模型

Fig.2 Casting model with gating system

图 3 为仿真结果。采用 ProCAST 软件进行数值

模拟,发现在正对冷铁两侧有缩松缺陷,见图 3a。对工艺进行调整,减小贴片宽度,增加冷铁宽度,数值模拟发现舱体中段薄壁处出现缩松缺陷,见图 3b,对该处继续增加冷铁宽度后再次模拟,缺陷消失,见图 3c。

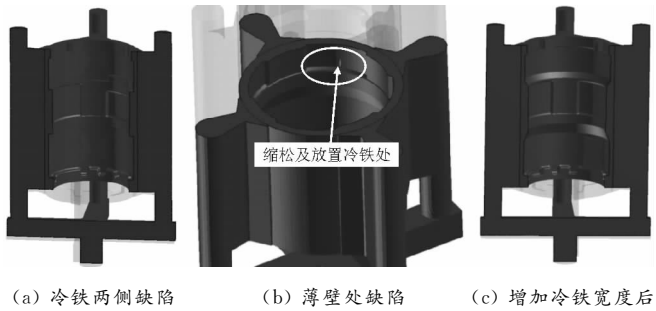


图 3 仿真结果

Fig.3 Simulation results

3.3 树脂砂铸造工艺验证

根据确定的树脂砂型砂配方以及铸造工艺开展工艺试验。准备成形冷铁、造型制芯用模具、砂箱和底板等工装。按树脂砂型砂配方配置树脂砂,并混合均匀。把冷铁配置在芯盒中,将混合好的树脂砂依次添加在底箱、过渡箱、中箱、盖箱和芯盒中,固化成形后,修整砂型砂芯。将调制好的阻燃醇基涂料均匀刷涂在铸型内表面和砂芯外表面,点燃涂料,烘干铸型型腔表面,将涂料表面打磨平整。将外型和砂芯组合,并放置过滤网、石棉线和信号线,利用锁紧装置锁紧铸型,准备浇注。

对使用全树脂砂造型工艺制备的壳体铸件进行 100% X 光检测,考察其内部品质,投产 4 件,首次 X 光检测合格 1 件,3 件存在超标缺陷,见图 4,主要在正对内浇道冷铁两侧发现 3 级缩松缺陷,另外中段未放置冷铁薄壁位置也存在树枝状缩松。两处位置缺陷与仿真结果基本一致。

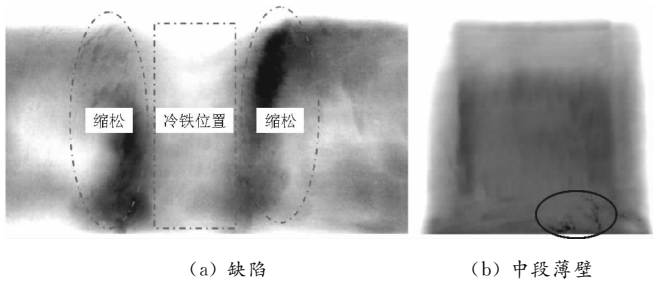


图 4 壳体铸件缩松缺陷

Fig.4 Shrinkage defects of shell castings

3.4 铸造工艺优化

增加正对贴片冷铁宽度,确保冷铁能将贴片完全覆盖,将中段薄壁处换成完整成形冷铁,去除原有边缘窄冷铁,确保冷铁能完全覆盖中段薄壁。进一步规范砂铁比为 1 : 2,同时进一步优化浇注参数,增加结晶增压

值,提高合金凝固压力,增加凝固速率,减少缩松发生概率。

按照调整后的工艺投产 20 件壳体铸件,首次 X 光检测合格 16 件,一次合格率为 80%,远超粘土砂工艺一次合格率水平,不合格的 4 件经返修后合格。工艺优化后投产的舱体铸件,缺陷位置较为分散,基本无大量固定位置重复缺陷,判断缺陷为偶发操作因素引起。后续投产 100 件,合格率达 90%,生产过程稳定。

4 结 语

通过开展航天镁合金壳体铸件合格率提升与稳定性控制研究,实现了合格率提升及生产稳定的目标。虽然合格率目标实现,但还需要进一步放大样本量开展试验,向“零缺陷”的目标努力。

参 考 文 献

[1] 王云华,陈力平. 浅谈航天工艺工作中的风险分析与控制[J]. 航天制造技术, 2014(3): 64-72.
[2] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册(第 5 卷)铸造工艺[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
[3] 童思艺. 铸造 FMEA 的常见误区及原因分析与对策[A]. 2013 年中国铸造活动周论文集[C]. 江苏无锡, 2013.

(编辑:张正贺)

三部委:推进一体化压铸成形、
轻质高强合金轻量化等核心
技术产业化应用

近日,工业和信息化部、国家发展和改革委员会、生态环境部联合发布了《关于推动铸造和锻压行业高质量发展的指导意见》(简称“指导意见”),力求让铸造和锻压行业焕发出新的活力。

《指导意见》明确指出,到 2025 年,铸造和锻压行业总体水平将进一步提高,产业结构更趋合理,产业布局与生产要素更加协同。重点领域高端铸件、锻件产品取得突破,掌握一批具有自主知识产权的核心技术,一体化压铸成形、无模铸造、砂型 3D 打印、超高强钢热成形、精密冷温热锻、轻质高强合金轻量化等先进工艺技术实现产业化应用;建成 10 个以上具有示范效应的产业集群,初步形成大中小企业、产业链上中下游协同发展良好生态。

(摘自压铸周刊)