

复杂铝合金壳体铸造过程的集成控制与应用研究

Integrated Control and Application Study of Complex Aluminum Alloy Shell Casting Process

冯超 纪旭辉 唐桢 / 中国航发西控

通过对复杂铝合金铸件熔化、精炼、浇注、凝固和取件等过程的自动控制，在实际生产中大幅降低了劳动强度，达到了提质降本增效的目的，也为同类型铸件的生产提供了参考。

长期以来，铝合金壳体铸造缺乏过程控制，尤其是熔化精炼及浇注过程的工艺参数受人为因素影响较大。同时，壳芯独立定位导致缺少维度方向控制，模具采用销子压板连接导致缺少结构性控制，造成铸件尺寸超差严重。

为了达到提质降本增效的目的，创新团队提出了对铸造过程进行集成控制的新思路，即以复杂铝合金铸件重点工序为突破口，首先，建立机器人浇注工作站，实现对铝合金熔化、精炼、浇注过程的自动控制；其次，通过配套制芯单元、结合机器人取芯、下芯夹具，实现对制芯、组芯及下芯过程的自动控制；

最后，通过全新的定位限位结构，提高金属型模具的自身定位精度，并设置限位信号，实现合模、开模、顶出、取件过程的自动控制。

通过以上过程的系统集成，最终实现航空发动机燃油控制系统中铝合金铸件生产的全过程控制，消除人为因素影响。

工艺方案实施

制芯工艺技术实施方案

细小壳芯的吹制工艺复杂，成形困难，特别是直径6mm以下的壳芯，全部采用常规的铜管成形工艺。创新项目通过研究射砂工艺，设计专用射砂板，调整射砂工艺参数等措施，首次成功试制出了最小直径

为2.5mm的壳芯。

独立壳芯缺少维度方向控制，容易出现偏摆、上浮等现象，导致内腔油路尺寸超差。创新团队设计了整体组芯的下芯工艺，内腔壳芯全部组装在冒口砂套上（见图1），下芯后定位在金属型模架横梁上。为保证顺利组装，设计了组芯夹具，保证组芯精度。复杂铝合金铸件内腔油路细小且组合砂芯较多，设计了一模多腔、双面射砂的工艺技术，进一步提高了复杂细小壳芯的生产效率。

通过制芯工艺的全过程控制，解决了复杂细小壳芯成形难度大、壳芯及组芯尺寸精度差、生产效率低的问题。

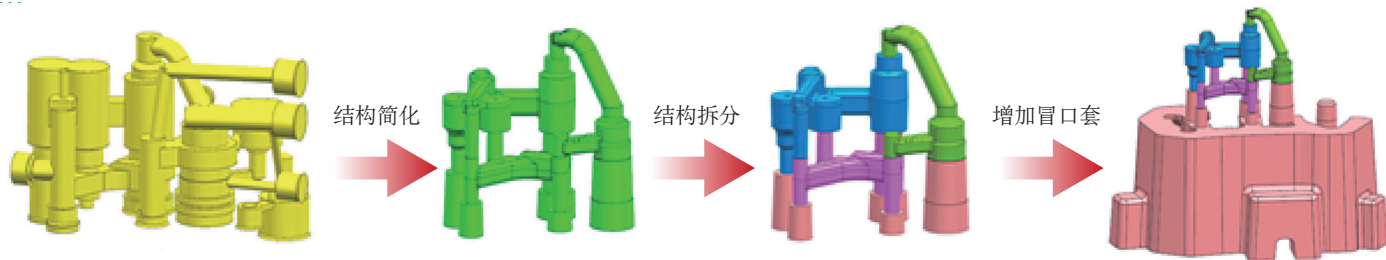


图1 壳芯组装结构控制

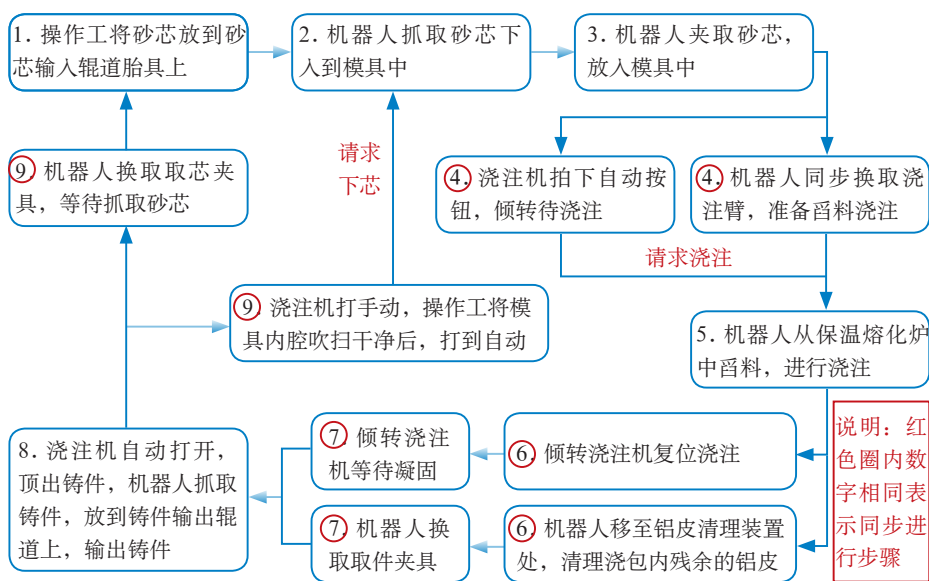


图2 机器人浇注工作站流程设计



图3 浇注机器人

机器人浇注工作站技术方案设计

铝合金熔化、精炼、浇注是铸件生产制造的核心工序，但长期以来受人因素为影响较大，铸件合格率较低，质量不稳定。据统计，铸件90%以上的缺陷都与这3个工序有关。

机器人浇注工作站流程设计如图2所示。

机器人浇注工作站呈岛式布局，包括1台浇注机器人（见图3）、1台熔化保温炉及1台倾转浇注机。配套设施包括铝皮清理装置、浇包加热保温装置、壳芯和铸件输送辊道、配套的组合芯支架和取芯、取件夹具等。

配套研发的氧化皮清理装置和浇包预热装置可以避免金属液的二次污染，提高铸件合格率。

由于航空发动机控制系统铝合金铸件结构各异且复杂，创新团队开发了机器人通用取芯夹具及取件夹具，以提高生产效率，保证下芯精度；通过熔化、精炼、浇注过程的自动控制，基本解决了铸件的内

部质量问题，大幅提高了铝合金铸件的质量和生产效率。

高精度金属型模具控制结构的研发设计

创新项目技术方案首次引入金属型模具结构。左半模通过滑块、滑座、限位块与模架配合安装，右半模沿导轨运动，控制了模具水平方向；半模侧面安装限位块，控制了模具开合模的垂直方向。由此实现了模具结构性控制，满足金属型模具精度要求。

浇注机和模具设计了“软连接”，前、后半模与浇注机十字键定位配合，夹板快速卡紧，左、右半模与浇注机连接采用“蘑菇头”连接，模架采用油缸压紧。消除了模具安装的过定位现象，大幅提高了模具精度，保证了铸件外形尺寸精度和表面质量。

通过金属模具的结构性控制，解决了铸件尺寸精度低、毛坯一致性差的问题，实现了浇注过程完全自动化控制，同时提高了生产效率。

实施实例验证

以航空发动机燃油控制系统的导向器壳体和离心泵壳体为例，对比应用前后的效果。

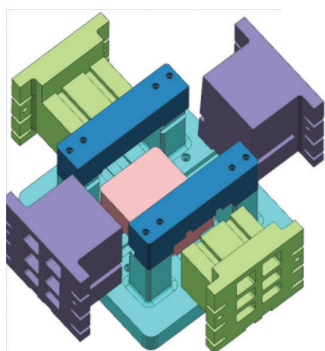
以传统方法生产该导向器壳体和离心泵壳体各18炉次，创新方案生产两项壳体12炉次、11炉次。两种生产方法生产后的合格率对比如表1所示。

传统工艺方案生产的导向器壳体和离心泵壳体合格率波动较大，波动范围均超过50%。采用创新工艺方案后，两项铸件合格率趋于稳定，铸件合格率大幅提升，合格率波动范围基本控制在10%以内。

传统工艺方案生产的导向器壳体和离心泵壳体尺寸精度差，大量铸件尺寸精度达不到CT7标准要求，表面质量较差。采用创新工艺方案生产的导向器壳体和离心泵壳体尺寸精度高，铸件外形尺寸精度达到CT6标准，内腔壁厚差控制在0.2mm以内，尺寸精度达到CT5标准，表面质量较好。

表1 合格率对比表

| | | 炉次 | 投入/件 | 报废分类/件 | | 平均合格率 | 合格率波动范围 |
|-------|-------|----|------|------------|------|-------|---------|
| | | | | 气孔、缩松、氧化夹杂 | 尺寸超差 | | |
| 传统方案 | 导向器壳体 | 18 | 354 | 113 | 52 | 46.6% | 70% |
| | 离心泵壳体 | 18 | 349 | 100 | 54 | 58.4% | 54% |
| 本项目方案 | 导向器壳体 | 12 | 476 | 70 | 1 | 85.1% | 8% |
| | 离心泵壳体 | 11 | 447 | 37 | 0 | 91.7 | 7.2% |



| 模块类型 横架类型 | 前半模块/ (mm × mm × mm) | 后半模块/ (mm × mm × mm) | 左半模块/ (mm × mm × mm) | 右半模块/ (mm × mm × mm) | 底模块/ (mm × mm × mm) |
|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| I | 200 × 220 × 260 | 200 × 220 × 260 | 170 × 235 × 200 | 170 × 235 × 200 | 210 × 160 × 80 |
| II | 210 × 225 × 280 | 210 × 225 × 260 | 180 × 240 × 210 | 180 × 240 × 210 | 220 × 170 × 80 |
| III | 220 × 230 × 300 | 220 × 230 × 300 | 190 × 250 × 220 | 190 × 250 × 220 | 230 × 180 × 90 |
| IV | 230 × 245 × 320 | 230 × 245 × 320 | 200 × 265 × 230 | 200 × 265 × 230 | 240 × 190 × 90 |
| V | 240 × 250 × 340 | 240 × 250 × 340 | 210 × 270 × 240 | 210 × 270 × 240 | 250 × 200 × 95 |
| VI | 250 × 265 × 360 | 250 × 265 × 360 | 220 × 280 × 250 | 220 × 280 × 250 | 260 × 210 × 95 |
| VII | 260 × 270 × 380 | 260 × 270 × 380 | 230 × 285 × 260 | 230 × 285 × 260 | 270 × 220 × 100 |

图4 模具的模块化系列化设计

主要技术创新点

复杂壳体高精度内腔铸造成形技术

创新团队通过自主设计工装，结合研发的原材料，生产出了最小直径2.5mm，长径比达到10倍的壳芯，在热芯领域属于重大技术突破，满足了燃油控制系统复杂铝合金铸件的生产需求；首次将红外扫描技术应用到整体组芯过程中，实现了多层壳芯的精密组合装配，铸件内腔尺寸精度提高了5倍；一模多腔、双面射砂技术，将壳芯生产效率提高了230%。

精密复杂金属型模具结构系统设计技术

针对产品的多样性，以模架为基础，本项目首次实现了金属型铸造模具模块化、系列化设计，以此

为基础，进行模具整体预装配（见图4）。系统性研究了高精度金属模具的结构设计，通过高精度导向限位技术和快速定位结构设计技术，提高了模具自身的定位精度，避免了安装过定位问题，提高了生产效率。

复杂铸造壳体内部组织缺陷控制技术

基于信息化集成控制，本项目打破了“热工不可控因素多，生产完全靠工人”的传统思维模式，首次实现了铸件生产过程的自动控制，即铝液定量、流场定速、浇注定时和凝固定向。生产的铸件通过严苛的质量检查和性能测试，平均合格率达到90%以上且过程稳定，生产效率提高了4倍。

结束语

创新团队研究的铝合金铸件工艺全过程集成控制技术，已应用到30余项复杂铝合金铸件生产中，铸件平均合格率超过80%，生产效率提高近3倍，节约生产成本900万元；预计未来5年燃油控制系统铝合金铸件呈指数型增长，预计节约生产成本超过6000万元。同时，新的技术可生产出外形尺寸精度达到CT6标准、内腔尺寸精度达到CT5标准的铸件，为航空发动机燃油附件铝合金壳体减重设计提供了有力支撑，将大幅提高航空发动机燃油附件设计水平。

航空动力

（冯超，中国航发西控，高级工程师，主要从事航空发动机复杂铝合金铸件铸造工艺技术及模具设计的研究）