

# 燃油控制系统复杂铝合金壳体铸造技术

## Casting Technology of Complex Aluminum Alloy Housing for Fuel Control System

■ 杨立新 毛娜 王江云 卢书勇 王勇 / 中国航发西控

燃油调节器壳体是商用航空发动机的主燃油控制装置的核心部件，具有外形高度镂空、内腔油路结构复杂、高承压、高尺寸精度、薄壁等复杂燃油控制系统壳体铸件的典型特征。创新团队通过开展研究，实现了复杂铝合金壳体铸件的快速研制，为此类典型燃油控制系统铸件的研制及生产提供了技术支持。

伴随航空发动机技术的进步，燃油控制系统的各项性能和技术指标的要求越来越高，提高其功能的集成程度、减轻质量的需求也更加迫切。作为整个燃油控制系统装配及功能实现的基础，铝合金复杂壳体的使用性能要求提高、复杂程度也急剧增加，高集成度、轻量化、多油路、高强度、高清洁度要求是燃油控制系统复杂铝合金壳体的五大要素，直接导致铸造工艺难度成倍增加，复杂铝合金壳体的铸造是制约商用航空发动机研发及生产的一大技术难题。

### 产品结构及要求

本项目中的商用航空发动机燃油调节器壳体为多数军用航空发动机同类功能壳体体积的4倍，外形呈高度镂空，各类凸起结构密布，内部油路多达百余条（同类复杂壳体内腔油路不超过50条），油路细长且不规则。

该壳体铸件将进行百分之百的X射线无损检测，加工完成后还会进行0.5 ~ 0.6MPa的气压密封性检测及20 ~ 20.1MPa的高压油路强度性能检测（一般军用航空发动机同类壳体试验压力为12 ~ 12.1MPa），因此，壳体铸件的组织致密性要求极高。

由于壳体承担了调节发动机供油的关键性能，其内部铸造油路清洁度要求极高，不允许有铸造型砂残留，所以，对该壳体的铸造流道要进行百分之百内窥镜检查。

### 铸造工艺方案设计

综合考虑铸件尺寸精度、壳体内部质量以及耐高压性能，传统铸造工艺方案生产的铸件已无法保证壳体完全满足以上要求。因此，创新团队选择尺寸精度高、铸件组织致密性高的金属模铸造作为壳体的基本工艺方案；镂空形状及内腔采用砂芯成形，因为铸件较大，传统浇注方式的浇注速度及充型过程难以控制，加之成形内腔油路及外形的砂芯数量非常多，浇注卷气及砂芯发气较多，所以选择充型较为平稳且排气效果良好的倾转铸造作

为浇注方案。

为了提前预测铸件可能产生的各类缺陷并提高铸件工艺方案的可靠性，中国航发西控的创新团队在研制初期增加了铸造模拟仿真手段。对不同的铸造工艺方案从温度场分布和最终铸造缺陷等方面进行多次迭代仿真分析，选取最优工艺方案。最后，应用仿真分析对最终工艺方案进行工艺改进及优化。

### 项目创新点

#### 高集成度壳体分区工艺设计技术

以往航空发动机燃油附件壳体为单功能结构设计，无结构及功能的集成，且结构比较规则统一，而调节器壳体功能集成较多（如图1所示），壳体各区域性能要求差异较大。上部分电磁阀壳体部分，最薄

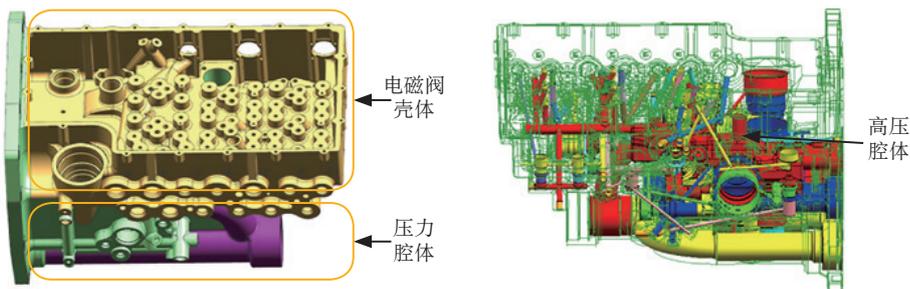


图1 调节器壳体不同区腔体

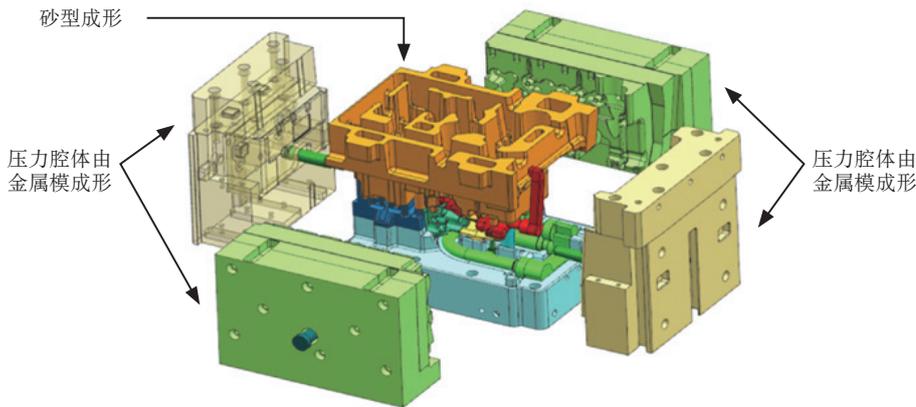


图2 调节器壳体不同腔体成形工艺

壁厚仅2mm，下部分压力腔体有非常高的抗压能力要求，组织致密性要求极高。针对不同结构对性能需求的不同，按照砂型成形、金属型成形工艺特点，分区域设计砂型成形工艺和金属型成形工艺（如图2所示）。将壁薄、冶金质量要求较低的电磁阀部分采用砂型成形工艺，并将2mm的壁厚部位采用冒口正对、直接补缩的方式。压力腔体采用金属型模具成形，保证高压腔体冶金质量，从而满足使用性能要求。

### 金属型铸造复杂镂空结构成形技术

为了实现发动机质量的减轻，壳体的结构须呈高度镂空。对于金属型铸造模具无法直接成形的镂空结构，分解成不同的砂芯后组装定位于金属型模具。采用金属型铸造及砂芯镂空结构组合成形的工艺方案，顺利保证了调节器壳体铸件不同结构特征的铸造成形工艺。

### 铸造油路内腔清洁度控制技术

铸造粘砂在铸造生产中非常常见，但其作为航空发动机三大危害之一，会严重影响发动机外场使用的安全性，可能导致发动机阀门卡死等故障，造成安全事故。调节器壳体内部油路数量有百余条，单条最长油路达

到300mm，且油路形状极不规则，最细油路直径仅为3.5mm，最薄油路壁厚仅2mm。目前，燃油附件壳体内腔油路铸造主要采用材料为覆膜砂的砂芯工艺。该工艺对于内腔清洁度的影响主要来自内腔残留的铸造型砂及涂料，而覆膜砂的材料性能、砂芯表面涂料工艺、除芯工艺、检查方法是控制砂芯在型腔内的残留的核心要素。针对在不同形貌下铸件粘砂的形成原理特点，从覆膜砂材料的性能指标选取、砂芯涂料涂覆、高频振动清砂、高压水冲洗工艺展开研究，团队开发了一种铸造油路内腔清洁度控制的组合工艺。另外，采用了内窥镜对内腔进行20倍放大检测，达到了无型砂残留。通过上述措施，成功解决了燃油调节器壳体内腔油路型砂残留问题，实现了复杂壳体内腔清洁度的严格有效控制。

### 倾转铸造及晶粒细化技术

调节器壳体是航空发动机的燃油附件中的大尺寸铝合金壳体，内部结构复杂，在充型、凝固过程中极易形成气孔缺陷的特殊结构铸件。团队采用倾转铸造工艺，并在倾转浇注过程中过滤金属液使其平稳流动，减少氧化夹杂及气孔缺陷的产生，提高了铸造壳体的内部质量。另外，壳体

材料为ZL101A，属于铝-硅（Al-Si）系合金，硅含量7%左右，在铸态下初生 $\alpha$ 枝晶较粗大，且分布不均匀，共晶硅呈现针状及片状形态，如不经变质处理，强度和塑性很低。而细化共晶组织及晶粒可以显著提高材料性能。合金熔炼时的精炼变质处理是改善铝-硅合金组织、性能的一项关键技术。采用行业中的常规处理工艺，虽力学性能、硬度等能满足要求，但在重力条件下，合金液浇注充型过程中，合金液的流动性和补缩性能较差，铸件产生热裂纹倾向增大。

针对常规精炼变质技术中暴露出的不足，创新团队创造性地提出了熔体“熔体净化+晶粒细化+变质处理”的复合工艺方案。通过对合金液进行净化处理，可对铝-硅合金铸态晶粒进行细化，增加铸造充型过程中合金液的流动性，减少铸件形成热裂纹的倾向。采用不易挥发、不易烧损、不易重熔失效和不易吸潮的长效变质剂，适用于调节器壳体浇注时间较长的生产现状，且更能使初生 $\alpha$ 相更细小、均匀，共晶硅由长纤维状变成短珊瑚状，而且共晶硅端部圆钝化，从而改善了铸件材料的力学性能，尤其是抗拉强度和延伸率。

## 结束语

通过对燃油调节器壳体铸件的铸造工艺技术研究，本项目实现了高气密性、高强度要求、镂空结构、薄壁铸件的制造成形，为该类型壳体的铸造开发了一套优良的铸造工艺，解决了相关的技术难题，并在民用发动机燃油控制系统铝合金壳体的生产和研制中进行推广。

**航空动力**

（杨立新，中国航发西控，工程师，从事航空发动机燃油控制器研制）