

# 航空发动机异形构件精密铸造技术

## Investment Casting Technology of Irregularly-Shaped Structural Components in Aero Engine

张龙飞 郭钊 谭诗薪 蒋明 / 中国航发南方

精密铸造广泛应用于制造结构复杂、机械加工困难的航空发动机涡轮机匣、导向器和叶片等热端部件。中小型航空发动机热端部件因结构集成化程度较高、异形结构特点显著，给精密铸造技术带来了巨大挑战。

**精**密铸造又称熔模精密铸造、失蜡铸造，通常指通过蜡料复制零件，然后在蜡料表面涂覆耐火材料形成型壳，再熔化脱除蜡料，最后向型壳中注入金属液形成铸件的工艺过程，如图1所示。我国早在春秋时期就采用精密铸造工艺制造出了各种精美的

青铜器皿、钟鼎及各类艺术品。20世纪40年代，精密铸造工艺开始用于生产航空发动机高温合金涡轮叶片，并展现出了优良的工艺优势，此后逐渐广泛应用于航空工业制造领域。

航空发动机结构件精密铸造工艺具有相当高的技术难度。一方面

精密铸造工艺过程涉及的工序繁多，生产周期长，且各工序均存在不同程度上影响精铸件冶金质量和尺寸形状的技术因素；另一方面为保障航空发动机的服役安全，精铸件的质量检验项目多，并且各项的技术条件十分严苛，任何化学成分、力学性能、晶粒度、显微组织、表

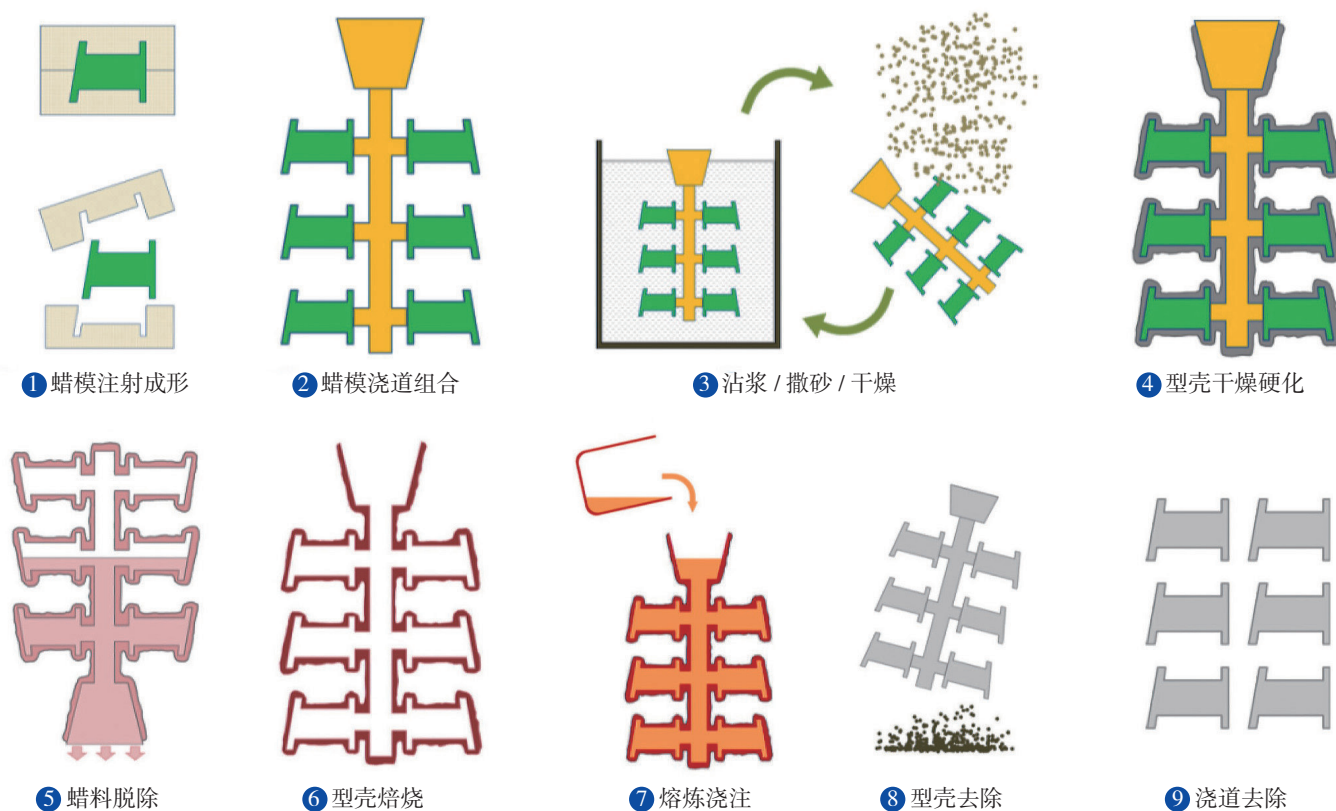


图1 精密铸造主要工艺过程

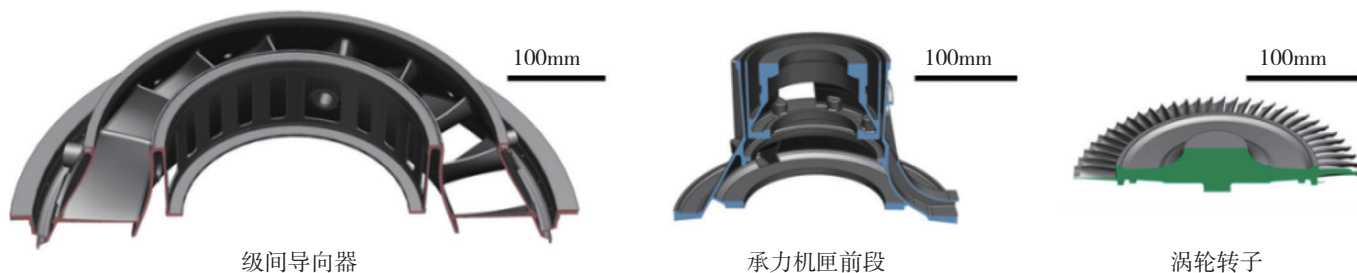


图2 典型异形构件精铸件

面质量、内部冶金质量或尺寸外形等因素的不合格都将导致铸件报废。

在中小型航空发动机领域，精密铸造技术面临更为严峻的挑战。这类发动机由于轻量化和整体化的设计需求，大量精铸件结构高度集成化。例如，涡桨发动机的级间导向器整体铸件集成了涡轮级间机匣、动力涡轮一级导向器和级间轴承座；涡轴发动机承力机匣前段由承力部件、喷射滑油部件、空气管路和油管等构成；涡扇发动机燃气涡轮转子由涡轮盘和涡轮叶片整体铸造，如图2所示。

这类形状不规则、空间结构紧凑且厚度不均的异形构件显著增加了陶瓷型芯、蜡模成形、浇道系统设计、型壳制备和熔炼浇注等过程的技术难度，导致精铸件冶金质量和尺寸精度控制难度升级，本文主要从陶瓷型芯技术、蜡模制备技术、

型壳制备技术、晶粒组织控制技术和铸造模拟仿真技术等方面来阐述异形构件精密铸造技术。

### 环状薄壁陶瓷型芯技术

复杂薄壁整体结构件往往带有复杂内腔、管路、油路和气腔等，这些半封闭复杂结构无法在蜡模成形时通过模具直接成形，在制壳阶段也无法被耐火材料充分覆盖或填实。在蜡模中预置陶瓷型芯是解决该类问题的重要手段，其中承力机匣前段、后段和轴承座主体等结构件则必须采用环状薄壁陶瓷型芯，其结构如图3所示。

环状薄壁陶瓷型芯的主要技术难点在于尺寸较大且壁厚薄，导致型芯在焙烧过程中容易变形或断裂，在蜡模注射成形时容易被蜡料挤压断裂，并且在熔炼浇注时容易由于高温金属液冲击而变形或断裂。对

此采用的型芯制备技术手段主要包括：研制高固相浆料用增塑剂，提高型芯料浆的流动性和充型能力；改进陶瓷型芯浆料配方，从而降低陶瓷型芯的收缩和变形量；优化型芯焙烧工艺，减少型芯变形和开裂倾向；在陶瓷型芯上增加补贴，防止焙烧时各向异性收缩导致陶瓷型芯内应力不均匀而断裂，焙烧后再将补贴打磨去除。

### 整体蜡模制备技术

在成形过程中，蜡模的表面质量和尺寸精度控制十分关键，因为这直接影响到精铸件的最终表面质量及尺寸。对于结构复杂的整体件，由于模具的分型面难以设定，行业内通常采用先拆分再拼装的蜡模成形方式，即先将整体件拆分成多个容易注射成形的分体结构，然后再借助定位工装将其拼装并焊接成整体。



图3 环状复杂薄壁型芯

拼装成形蜡模主要存在的技术问题有：尺寸一致性差，拼装与焊接均由手工完成，无法稳定控制每次拼装时分体蜡模与工装基准的贴合程度以及焊接时蜡模的受热变形程度，导致整体蜡模尺寸波动；表面质量难以保证，焊接处由手工填蜡、熔焊和修整，导致焊缝及周边区域的蜡模表面质量易受损，并且手工焊接容易出现虚焊和漏焊，导致焊缝区域在热应力作用下容易开裂，最终影响型壳质量，导致铸件表面质量不合格或形成夹渣缺陷。

整体蜡模技术是指采用高精度模具单次压制整体蜡模成形，无须进行手工拼装和修整，从而达到稳定控制蜡模尺寸精度并提升表面质量的目的。然而，整体蜡模目前面临的主要技术问题有：整体结构差异造成蜡料各向异性收缩，导致蜡模变形；整体模具涉及活块多，方案设计困难。对此，一方面需要基于大量基础数据来预测整体蜡模的收缩变形规律，从而在模具设计时预置合理的蜡模变形补偿量；另一方面需要开发仿真技术来优化模具设计方案，同时还需开发优质水溶芯来解决整体蜡模开合模问题和保证蜡模表面质量。通过上述措施，目前部分涡轮导向器、转子和多联导向叶片已经可以实现整体蜡模成形。

### 高性能型壳制备技术

型壳质量是影响精铸件质量最显著的因素。铸件常见的表面缺陷如飞翅、流纹、毛刺、铁瘤、气孔、针孔、分层、落砂、鼓胀、凹陷、变形和开裂等，大部分都归因于型壳表面裂纹、蚁孔、气泡，型壳硬化

不彻底或透气性差，焙烧不完全，高温吸气以及型壳与金属液反应等。统计表明，由型壳质量不良造成的精铸件返修或报废比例高达60%~70%。

高性能型壳本身应具有优异的抗热震性、高温强度、导热性能、内表面高温稳定性和低粗糙度等，以满足金属液高温冲击、高温化学反应和凝固散热等方面的性能需求。对于结构复杂、空间结构紧凑的异形件，型壳制备过程中存在的主要技术难点包括：沾浆时陶瓷料浆容易在蜡模拐角处堆积，难以在蜡模表面形成均匀的料浆层；撒砂时砂粒难以涂覆到被异形结构遮挡的区域，造成涂覆厚度不均匀；干燥时型壳厚大部位难以彻底硬化；脱蜡时由于蜡料受热膨胀以及结构导致的排蜡受阻，型壳容易被胀裂；异形结构导致残留或进入型壳内部的异物难以清理，造成铸件夹渣。

目前，精铸件型壳普遍采用硅溶胶为黏结剂，而根据耐火材料的不同，型壳主要分为锆英砂系、刚玉砂系和莫来石系。其主要制备技术要点包括：严格控制耐火材料的纯度和粒度，硅溶胶的浓度，以及耐火材料、矿化剂和硅溶胶的比例，陶瓷料浆的搅拌时间和黏度等，以稳定控制涂料厚度和均匀性；严格控制制壳间环境温湿度、风速和风量等，以稳定控制型壳的干燥速率和干燥程度；制定合理的陶瓷料浆配比、涂覆层数、干燥和焙烧工艺，以获得表面质量良好、尺寸精度高、高温强度高且铸件冷却过程中溃散性良好的型壳；增设蜡模排蜡口和控制浇道蜡与零件蜡的温度差异，以获得可控的蜡模熔化顺序，改善

机匣和导向器类型壳脱蜡时由于蜡模膨胀而产生裂纹。

### 晶粒组织控制技术

晶粒组织影响合金的抗疲劳、抗蠕变和抗热冲击等关键高温性能，因此是精铸件冶金质量的重要指标之一。高温合金等轴晶精铸件最常见的晶粒缺陷包括薄壁边缘区域出现的垂直于边缘的柱状晶，以及厚大部位出现的粗大晶粒。目前，精铸件晶粒组织控制技术的主要手段可分为热控法、化学法和动力学法。

热控法是指通过控制型壳预热温度、金属液的精炼温度和时间，来增加金属在凝固时的过冷度和冷却速率，从而达到限制晶粒长大和细化晶粒的目的。豪梅特（Howmet）和PCC等公司采用热控法已经实现了复杂薄壁件内部致密度和晶粒组织的综合控制，晶粒度等级（ASTM）达到了3级。目前，国内各大高校和科研机构，包括西北工业大学、钢铁研究总院、中国航发航材院和中科院沈阳金属研究所等，均已对热控法开展了广泛的应用研究。例如，钢铁研究总院已经应用热控法实现了ASTM 2~3级且充型完整的K4202合金复杂薄壁件。异形构件由于金属液充型困难，采用热控法降低浇注温度后，容易导致铸件充型不完整，因此热控法在异形铸件上的应用受限。目前，在热控法的基础上应用离心铸造技术是解决涡轮导向器和转子类铸件充型和晶粒度控制难题的一个研究方向。

化学法是指向金属液中加入形核剂，或间接在型壳内表面涂覆形核剂，促使金属液在凝固时形成大量非均质核心，从而使晶粒组织

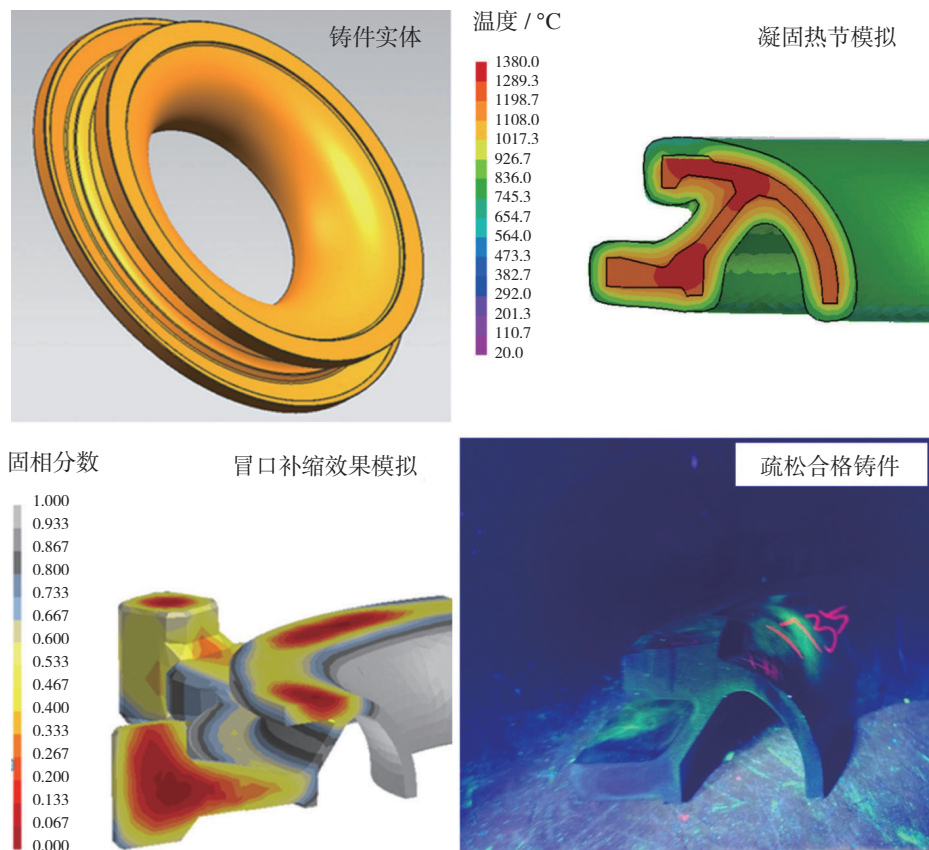


图4 借助模拟仿真技术解决叶轮外罩铸件内部疏松实例

达到整体细化或表面细化的效果。目前，精铸件普遍采用以铝酸钴( $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ )为孕育剂的表面细化技术。通过控制锆英粉与铝酸钴的粒度分布，以及陶瓷料浆中锆英粉、铝酸钴与硅溶胶之间的配比，可以获得匹配熔炼浇注工艺的表面细化涂料和表面细化技术，显著降低整体导向器、导向叶片和涡轮转子类精铸件在叶片排气边薄壁区域出现柱状晶缺陷的比例。

动力学法是指在金属液浇注和凝固过程中施加外力，迫使金属液产生振动或搅动，使已长大的枝晶破碎形成大量晶核，从而获得晶粒细化的铸件。中国航发航材院应用铸型搅动技术在K492M合金向心叶轮上实现了整体细晶铸造，平均晶

粒等级达到ASTM 1级。中国航发南方目前正联合东北大学开展基于电磁振荡原理的晶粒细化技术应用研究，用于控制导向器和机匣类结构件的晶粒组织。

### 铸造模拟仿真技术

精密铸造工艺涉及工序繁多并且生产资源昂贵，导致铸造工艺参数试验验证周期漫长且成本高昂。近年来，随着计算机数值计算技术的快速发展，铸造模拟仿真技术取得了长足进步，其基础和应用研究也越来越受到国内外高校、科研机构 and 精密铸造企业的重视。图4为叶轮外罩使用Procast仿真工具辅助解决内部疏松的示例，通过分析铸件实体的热节分布和模拟计算冒口的补

缩效果，选取了合理的浇道冒口系统，使叶轮外罩热节处的疏松得以消除。

铸造模拟仿真技术的主要优势在于可以直观地展现铸造过程中金属液的流动模式、铸件凝固时温度场、应力场和显微组织演化过程，从而迅速预测铸件出现欠铸、疏松、变形和裂纹等缺陷的倾向，指导工艺优化方向，提高精铸件的研发效率。然而，铸造模拟仿真结果强烈依赖于采用的仿真模型、性能参数数据库和设定的边界条件等，这要求仿真工具具备成熟的计算模型和完善的材料参数数据库。因此，仿真技术的开发需要基于实际的浇注过程持续采集现场数据，不断完善材料及工艺参数数据库，以提高仿真过程与实际工艺过程的匹配度。此外，仿真人员不仅要深刻理解精密铸造工艺过程，而且要熟知数值模拟背后的基本原理和算法，这样才能借助铸造模拟仿真工具得到具有参考意义的模拟计算结果。

### 结束语

中小型航空发动机异形构件不规则、复杂和紧凑的结构特点给精铸件蜡模制备、型壳制备、凝固组织控制和尺寸控制等带来了独特的技术挑战。针对异形构件的材料和结构特点，发展环状薄壁陶瓷型芯技术、整体蜡模技术、高性能型壳制备技术和晶粒组织控制技术和铸造模拟仿真技术，是提高异形构件冶金质量和尺寸精度的重要技术手段。

航空动力

(张龙飞，中国航发南方，工程师，主要从事高温合金精密铸造技术研究)