

民用涡轴发动机典型件制造技术概述

Typical Parts Manufacturing Technology of Civil Turboshaft Engine

■ 程世扬 程春尧 邓春珍 / 中国航发南方

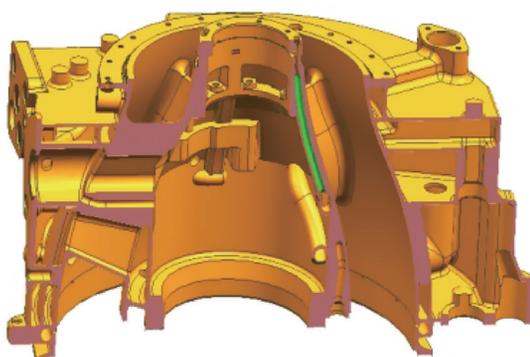
为贯彻落实制造过程适航要求、解决民用涡轴发动机制造工艺技术问题，通过设计和工艺、适航和质量相关活动有机融合，开展低成本制造工艺技术的攻关研究等，可有效降低制造成本、提高产品质量。

民用航空涡轴发动机为满足先进性和经济性要求、确保适航安全和质量水平，采用了大量先进材料、技术和结构，以使性能更先进、结构更紧凑、质量更轻，但同时带来了不少制造困难问题。本文选取具有先进中小民用涡轴发动机特色的机匣、轮盘、涡轮叶片等典型件，在分析其材料结构、工艺特点的基础上，着重概述如何通过复杂结构件的集成化、数字化制造等技术攻关，提升工艺水平，推动民用涡轴发动机典型件制造工艺技术向多元纵深发展。

复杂结构件集成化制造

复杂结构整体件铸造

为适应先进中小型民用涡轴发动机结构空间小、可靠性高、功率/质量比高的要求，大量采用各种铝合金、钛合金、高温合金铸造的整体机匣、轴承座、导向器毛坯。这些整体铸件集油路、气路于一体，集成度很高，结构紧凑、型腔复杂、薄壁窄槽，不同部位壁厚差异大，有的部位壁厚特别薄。通过采用有色铸造、精密整体铸件仿真技术模拟，优化浇注系统结构、工艺参数，合理选择陶瓷型芯方案，设计好模具结构，解决型芯定位问题，



(a) 铝合金进气机匣



(b) 高温合金动力涡轮轴承座

复杂型腔结构整体铸件

优化毛坯结构，改善尺寸、冶金缺陷，解决了这些整体铸件尺寸难控制、补缩困难，易形成缩孔、疏松、欠铸等问题。

异种材料焊缝和多层焊接

涡流机匣为整体薄壁、多层、多腔焊接件，由120个零件、160条焊缝、4层多腔体焊接而成，焊种多、焊接变形大，焊接工艺要求高，需要分析、掌握薄壁零件加工、焊接变形规律，突破新型钛合金、镍基合金等不同材料薄壁、大尺寸焊接变形控制技术。先进的电子束焊、激光焊、自动氩弧焊、真空钎焊等焊接工艺应用于异种材料连接，提高了焊接强度，降低了焊接应力，实现了不同材质、不同焊缝组成的多层、多腔、复杂结构焊接。

新型增材制造

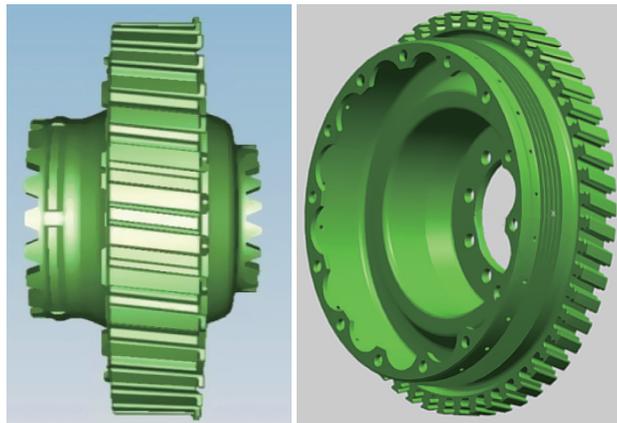
为解决结构件零组件配套层级、数量多、制造周期长等问题，减少零组件数量和减轻质量，对复杂的热端机匣采用新型增材制造技术制造毛坯，使零组件数量大幅度减少，由原有29个零件组成变成了1个零件，取得了显著减少零件数量、减轻质量、降低制造成本的良好效果。新型增材制造技术在机匣、管路等零件制造和修复中应用范围已越来越广。

多工序集成自动制造

为解决复杂结构整体机匣制造工序多、转工多、周期长、基准多次转换带来的误差大等问题，通过采用多工序集成自动制造技术，将分散工序向集成工序制造模式转变，



涡轴发动机机匣自动化加工单元



(a) 燃气涡轮盘

(b) 动力涡轮盘

涡轮盘

应用带自动换刀库的双或多工作台车铣复合、数控车铣或铣磨复合等工艺技术，配装传送带和机械手，按零件族组成面向智能化的数字化、自动化生产线或生产单元，在一台或几台机床上完成零件加工，使生产组织变得非常简单，生产质量和效率大幅度提高。

叶轮和盘轴制造

叶轮制造

中小型民用涡轴航空发动机压气机通常采用多级轴流叶轮加一级离心叶轮的高精度圆弧端齿连接增压结构，具有高增压比、结构紧凑的特点。针对整体宽弦叶盘和高增压离心叶轮上的叶片和轮毂型面，

传统制造工艺为数控铣削后手工打磨抛光，效率低、质量不高。在研究低成本制造工艺基础上，采取桶形（锥鼓）铣刀宽行数铣、高速铣等工艺铣削叶片和轮毂型面，显著提升加工效率；离心叶轮轮毂、整体叶盘的叶身上保留刀纹，采用磨粒流光整，降低了劳动强度，节约了加工成本，但要求一次铣削加工到位，既要满足形状精度，又要达到叶片频率控制范围；各叶片盘和离心叶轮的圆弧端齿采用高效一次成形磨削加工，保证了凸、凹齿之间相互配合的高精度质量要求。

涡轮盘制造

燃气涡轮第一级和第二级盘、动力涡轮第一级和第二级盘的毛坯

均为高温合金模锻件。通过优化锻造及热处理工艺，细化预制坯和热模锻工艺参数，采用先锻造开坯、后模锻成型的方式，适当降低始锻温度，细化盘坯晶粒，保证了涡轮盘模锻件晶粒度要求和组织均匀性、性能稳定性；时效处理采用低温装炉，缓慢升温，设置升温台阶，保证到温后保温时间充分，避免产生裂纹。各涡轮盘沿圆周均分布有几十个高精度枞树型榫槽，轮廓度精度很高，齿距公差小于0.01mm；对榫槽采用高速拉削工艺加工，从拉刀材料、拉削速度等方面进行优化，减小拉刀磨损，满足了榫槽精度要求；榫槽型面等部位喷钢丸进行表面强化处理。燃气涡轮盘圆弧端齿采用高效一次磨削加工成形。

大长径比细长空心轴制造

发动机压气机和燃气涡轮之间采用中心拉杆连接，动力涡轮功率通过动力涡轮传动轴穿过中心拉杆内孔从发动机后端传递至前端。由于动力涡轮传动轴内装测扭轴，因此动力涡轮传动轴、中心拉杆均为典型的细长空心轴类件，工作时需要承受很大的轴向拉紧力，动力涡轮

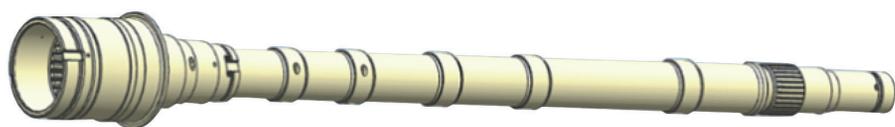


(a) 整体叶盘

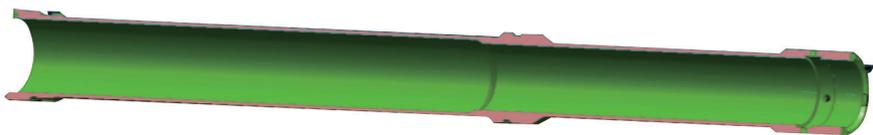


(b) 离心叶轮

轴流叶轮和离心叶轮



(a) 动力涡轮传动轴



(b) 中心拉杆

大长径比细长空心轴

轮传动轴还需要传递发动机动力涡轮输出扭矩。动力涡轮组合转子为跨两阶临界转速的挠性转子，对高速旋转下的动挠度控制有极高要求，这些要求无疑提高了零件内外连接螺纹、花键、壁厚、动挠度控制等制造工艺技术难度。

动力涡轮传动轴、中心拉杆毛坯均为高温合金锻件，通过降低始锻温度，用工装校正锻件，减少翘曲，固溶时效后增加冷、温校形，保证了热工艺加工质量。动力涡轮传动轴长度超过700mm，长径比大于50:1，内孔均有台阶，杆部跳动要求小于0.03mm，通过采用高精度数控深孔钻设备、专用刀具，优化工艺参数，克服细长轴壁厚薄、刚性差困难，确保了细长空心内孔加工质量；内、外螺纹和花键采用高精度成形磨削加工，保证了螺纹中径和花键节圆跳动、同轴度、壁厚等几何量要素合格；动力涡轮传动轴在单件通过低速动平衡后，组合成动力涡轮转子再进行高速动平衡，检测、控制高工作转速下动力涡轮传动轴相关截面的动挠度，确保其跨两阶临界转速动挠度满足技术指标要求。

涡轮叶片无余量精铸与加工 涡轮工作叶片制造

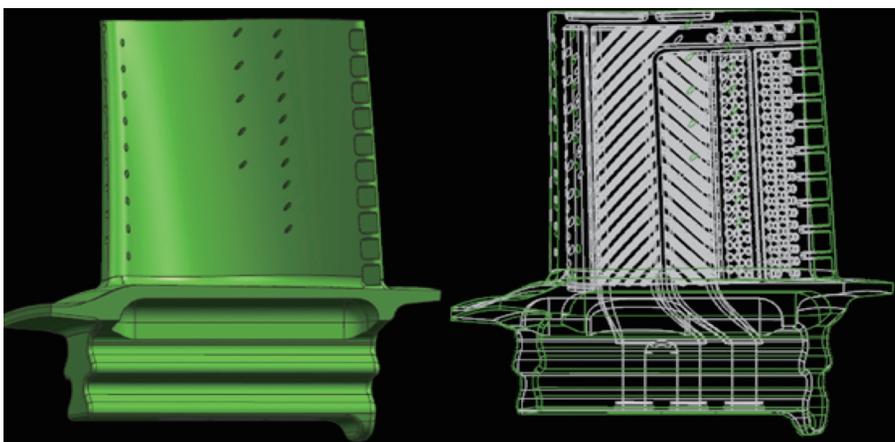
民用涡轴航空发动机单晶、定向结晶高温合金涡轮工作叶片具有多腔回流空心气冷复杂结构，内腔有多条细小横肋及筋板；叶身长、弦宽，叶身薄处壁厚小于0.6mm，叶身、尾缘等部位上有多个小气膜冷却孔，精度高、孔径小。精密铸造毛坯工艺已解决内腔成形工艺难度大，壁厚、叶型尺寸以及晶粒度难控制，型腔内断芯、偏芯等问题，实现无余量精铸叶身型面，铸造合格率明显提高；燃气涡轮工作叶片叶尖、叶身、排气边等部位分布着

几十个直径约 $\phi 0.3\text{mm}$ 的气膜孔，为控制这些细小气膜孔制造质量，防止产生传统电火花加工重熔层，研究采用飞秒激光等高效加工技术；榫头轮廓度精度很高，齿距公差小于0.01mm，采用蠕动成形磨削工艺保证了榫头齿距和轮廓度技术要求；榫头等表面进行喷丸强化处理。

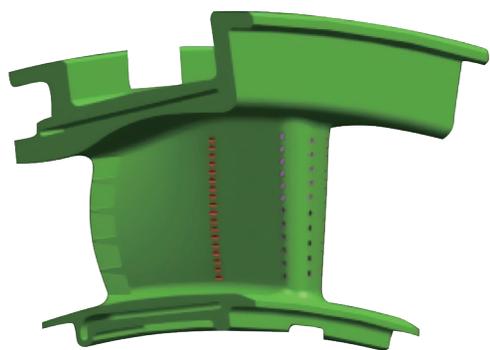
涡轮导向叶片和导向器制造

涡轮导向器叶片毛坯为高温合金铸件，叶盆、前缘均有细小气膜孔，内腔结构复杂，有多条横肋及筋板、凹槽，易造成铸造时型芯变形，使壁厚、出口端尺寸难控制，型芯窗口处厚度较薄，高温强度不够，浇注时易断芯、堵塞排气窗口。动力涡轮导向器采用高温合金整体式毛坯，由无余量叶片和内外流道环组成，直径大、薄壁部位多，内外流道壁厚仅1mm左右，叶片排气边最薄处仅0.4mm，叶型尺寸公差小。

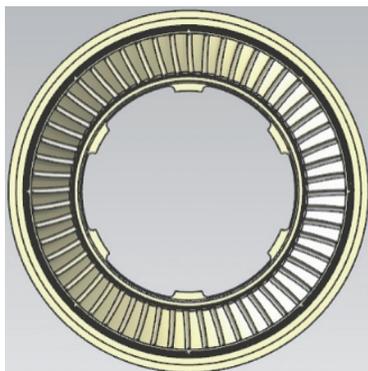
为此，通过铸造工艺仿真、摸索变形量、优化蜡模组合方案，毛坯铸造时采用陶瓷型芯成形工艺与定位技术，提高陶瓷型芯性能，蜡模压制时贴芯撑，解决了毛坯疏松、缩孔、欠铸、薄壁部位充型与晶粒



复杂气冷结构燃气涡轮工作叶片



(a) 燃气涡轮一级导向器叶片



(b) 整体动力涡轮二级导向器

涡轮导向叶片和导向器

均匀细化难兼顾、型芯残留及型芯变形等问题，实现叶片型面无余量精铸成形，合格率明显提升。零件叶身气膜孔采用满足重熔层要求的电火花、激光等加工技术和五轴数字化光纤检测技术，保证了孔径、角度和位置精度等技术要求。

表面处理与清洁度控制

各种涂层制造

为适应发动机高转速、封严和耐高温要求，各种封严涂层、热障涂层、化学镀镍层和无机铝抗冲刷防腐涂层等涂（镀）层种类增多，涉及涂层制备工艺主要有气相渗铝、真空电弧离子镀，以及火焰喷涂、超声速喷涂、真空等离子喷涂等，制备工艺进一步精细，例如，大弯管表面喷涂陶瓷基复合材料前后外观情

况对比明显。

表面完整性制造

民用涡轴发动机对有关转动部件、承力件等零组件疲劳寿命、可靠性等提出了更高要求，为此，对涡轮盘、离心叶轮、叶盘、挡板等核心承力零件腹板及安装精密孔等采用表面完整性制造工艺，贯彻表面完整性技术要求，主要采取以下措施：一是推广应用电解或化学铣等低应力加工技术，减少零件加工残余应力；二是对涡轮盘、叶片等零件部分表面喷钢丸、陶瓷丸进行表面强化处理，提高零件疲劳寿命；三是优化磨削加工等工艺参数，防止齿轮、轴等零组件表面磨削烧伤，降低磨削残余应力；四是合理安排去应力工序，消除或尽量减少加工残余应力；五是对涡轮叶片、导向

器、机匣等流道件表面进行振动光饰、磨粒流抛光等光整加工，提高表面粗糙度等质量特性。

清洁度控制

民用涡轴发动机因转速高、可靠性高等要求，对有关燃油、滑油、气道等零组件，以及部附件和整机装配、试验等环节多余物与清洁度提出了很高的要求。多余物与清洁度防控要求正贯彻至发动机产品全产业链、制造全流程，产品制造、试验、油封、包装、转运和存放等工艺过程中多余物与清洁度的防控能力明显提升，主要措施包括：合理安排各种多余物防护与清洁度控制工序，制造、试验前对油道、气道、内腔等进行封堵，防止多余物进入；采用先进的去毛刺与飞边、气体检漏试验、超声清洗、真空干燥等清洁工艺技术；对试验和试车用燃滑油、气体等介质中多余物进行严格过滤与防堵；对清洗、试验



(a) 气相防锈包装



(a) 喷涂前



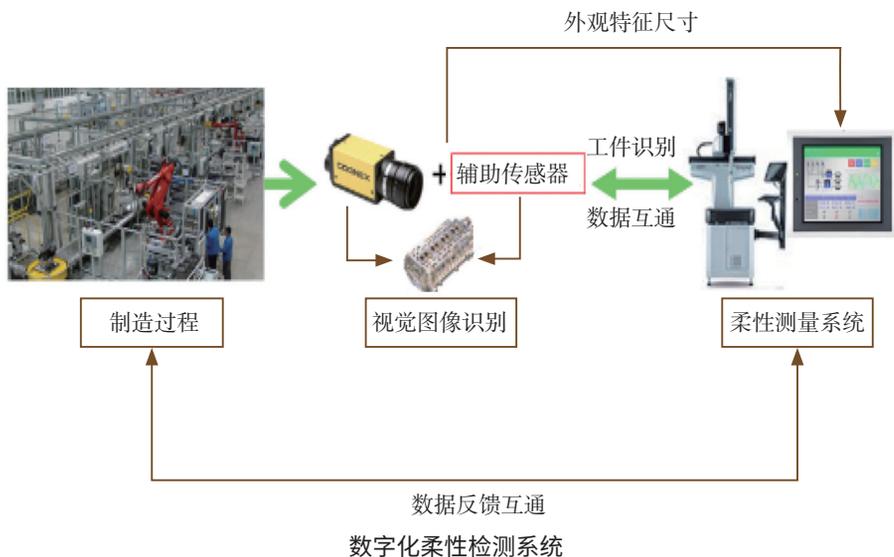
(b) 喷涂后

大弯管喷涂陶瓷基复合材料涂层前后对比



(b) 全自动水剂清洗设备

多余物与清洁度控制工艺设施



用燃滑油等介质中的污染物(颗粒)进行检测分析,确保符合要求;推广应用气相防锈袋、真空包装等防护技术,改善现场文明生产和整洁环境等。

数字化制造与检测

基于数字化的制造

数字信息技术提升工艺能力,基于材料工程、工艺工程参数、质量检验等数据为支撑的工艺仿真技术正加速应用,研究刀具、工件和机床受力变形情况下的切削仿真技术,焊接、铸造等特种工艺仿真技术正进一步发展,各种仿真、制造、检测分析等工业软件更加成熟、得到广泛应用。对发动机机匣、叶盘、叶片、轴、喷嘴、涡轮叶片等结构相对复杂、制造周期长、生产批量大、质量要求高的典型零件,用基于数字化、自动化制造技术,改造或建设的零组件专业生产线正向柔性化、智能化方向转变,以提高制造工艺水平和快速响应能力。

基于数字化的检测

通过应用四轴和五轴坐标测量、光学扫描和拍照、数字射线(DR)检测、工业电子计算机断层扫描(CT)检验、人工智能深度学习等先进数字化技术和检测专业技术,成功解决了叶片、机匣、喷嘴等典型零组件制造过程检测难题,实现了叶片冷却气膜小孔和喷嘴小孔等微小孔空间位置尺寸及角度的检测与自动分析,薄壁钣金件、环形叶型孔、大型机匣复杂型面等不规则三维型面等特征型面的快速光学检测与自动分析。基于检测数据自动采集、分析处理及人机交互技术,构建多系统集成应用的数字化检测信息系统和数据库,融入面向智能化的涡轮工作叶片、机匣等典型件数字化、自动化生产线,正推动质量检验管控从传统手工模式朝无纸化、电子化、网络化方向实现根本性变革。

基于数字化的信息技术应用

基于数字化的信息网络技术

正助推工艺与设计和质量等相关的产品数据管理(PDM)、制造执行(MES)、企业资源计划(ERP)和质量(QMS)等系统有机融合,推动生产车间或生产线向数字化、自动化、智能化方向发展,以更好地实现工艺技术、生产、质量信息化高效管理。一方面,综合管控企业内工艺、设备、工装、生产、检验等状况,充分利用带自动换刀结构的先进加工设备,打造盘、轴等典型零组件信息化架构的数字化生产线或车间,大幅减少工具工装制造、准备、维护成本,缩短零件的加工工艺路线,提高产品质量稳定性和生产效率;另一方面,应用信息技术构建集异地人员、技术、设备优势的制造网络系统,具有自我学习、复制能力,功能更加复合完善,设备与设备之间具有联网、通信功能,数据能够自由传递,有效克服了以往制造周期长、成本高、反应慢等缺点,大幅度提高制造能力和效率。

结束语

民用涡轴发动机制造工艺技术正呈多元发展态势,一大批满足环保、适航、低成本要求的先进制造新工艺、新设备、新方法等将推广应用,基于数字化的专业化分工、网络化协作将加强,“小而全、大而全”传统粗放的组织管理模式正在向以工艺集约化、精益化、自动化、智能化为基础的“小核心、大协作”生产模式转变。

航空动力

(程世扬,中国航发南方一级型号总师,研究员,主要从事航空发动机制造工艺、检验、质量、服务与适航工作)