

商用涡扇航空发动机关键制造技术

Key Manufacturing Technology for Commercial Turbofan Engine

■ 李金声 雷力明 张燕 / 中国航发商发

新一代航空发动机的研制越来越多地依赖材料和制造技术的进步。高性能航空发动机研制的迫切需求将促进航空发动机关键制造技术获得新的突破。中国航发商发以“两机”专项为契机，明确目标、聚焦瓶颈、集智攻关、加速成熟，助力我国商用大涵道比涡扇航空发动机早日实现商业化应用。

新型航空发动机研制是我国实现从制造大国向制造强国成功转型的标志之一，在“中国制造2025”十大重点领域规划中占据重要地位。随着国产商用大涵道比涡扇航空发动机研制的不断深入，开展商用涡扇航空发动机关键制造技术研究，对保障项目工程化研制顺利推进具有重要意义。

新一代商用航空发动机研制的主要特点与挑战

与现役航空发动机相比，新一代航空发动机的燃油消耗率、噪声裕度、NO_x排放、增压比、涡轮前温度等指标均有很大提升。为了满足日趋严格的技术指标要求，需要新的设计、选材、制造等方面的关键技术来进行支撑。例如，LEAP发动机风扇部件采用钛合金包边复合材料风扇叶片、复合材料风扇机匣和空心出口导向叶片（OGV），压气机采用钛合金整体叶盘，燃烧室采用双环预混旋流燃烧技术，NO_x排放量同现有CAEP/6要求相比降低约50%，涡轮部件采用陶瓷基复合材料涡轮外环、导向叶片及高温涂层技术；PW1000G发动机采用轻质风扇叶片、复合材料风扇机匣，压气机采用刷式

密封，燃烧室采用浮壁技术，涡轮采用指尖密封等技术；遑达XWB发动机采用钛合金宽弦后掠空心风扇叶片，轻量级钛合金风扇机匣，单环贫油混合燃烧室，第三代单晶高压涡轮导向叶片，钛铝（TiAl）合金叶片低压涡轮导向叶片等。

新材料、新结构和新技术的应用对商用航空发动机的制造技术提出巨大挑战。先进航空发动机越来越多地使用了整体结构、空心结构、夹层结构、轻质结构和耐高温结构等新型结构，并开始采用高温钛合金、单晶高温合金、金属间化合物、陶瓷基复合材料等新型材料。此外，短舱部件具有尺寸大、壁薄、结构复杂等特点，国内制造成熟度较低，加工变形、残余应力控制方面也具有一定困难。

商用航空发动机的研制还要接受适航法规的挑战。制造标准的建立与验证、产品加工的符合性、制造过程的质量稳定性等，都需要满足适航规章的严格要求。高性能、高可靠、长寿命、低噪声、低排放和低成本，是新一代航空发动机研制的基本特征，标准适用、过程受控、证据充分是对产品制造过程的基本要求。

制造技术管理也面临新挑战。设

计、材料、工艺的正向研发并行推进，制造技术研究与技术管理也面临着多方案攻关构型管控难度大、试验验证资源冲突、迭代提升周期紧张等实际问题。

国产商用涡扇航空发动机关键制造技术研究进展

为了提高产品的国际竞争力，国产商用涡扇发动机研制也具有自身的特点。在新结构应用方面，风扇部件采用外涵OGV与支板融合设计、树脂基复合材料风扇叶片及包容机匣；高压压气机采用低轮毂比设计与双级整体叶盘来提升效率、减轻质量；燃烧室部件采用增材制造燃油喷嘴、冲击一发散双层带涂层异形冷却气膜孔等结构；涡轮部件采用新一代三维气动设计技术、盘轴一体化结构、主动间隙控制、高升力叶型设计等技术。在新材料应用方面，压气机盘、篦齿盘及高压涡轮盘采用新型粉末冶金材料；高低压涡轮转子叶片、导向叶片采用先进单晶材料及TiAl合金材料；短舱系统50%零组件采用复合材料等。在新工艺应用方面，主要涉及增材制造、复合材料制造、焊接及特种加工、高效数控加工、表面工程、

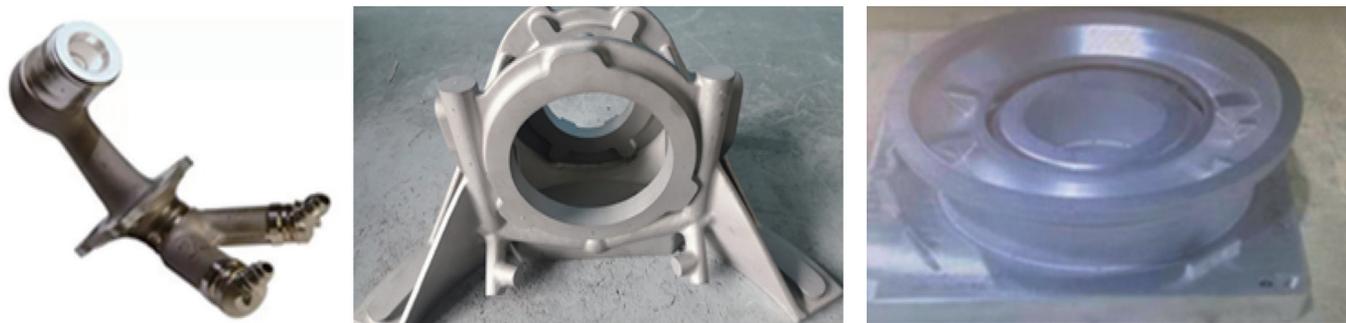


图1 增材制造的典型零部件



图2 复合材料典型零部件

微尺度、弱结合缺陷无损检测、智能化装配工艺等。在共性基础技术方面，主要涉及的工艺设计一体化、抗疲劳制造、边缘处理、多余物与清洁度控制、禁限用工艺等都获得初步应用。

增材制造技术

增材制造技术具有提升设计自由度、减轻结构质量、缩短研制周期等特点。目前，已经实现燃油喷嘴、中央传动齿轮箱（IGB）机匣、轴承座等的研制，为国产商用航空

发动机研制在结构整合、性能提升、降低成本、缩短周期方面发挥了重要作用，典型零部件如图1所示。存在的主要问题是标准体系不健全、缺乏增材制造零件适航经验等。后续主要工作方向是完善增材制造相关技术标准，推进适航验证工作。

复合材料构件制造技术

复合材料具有抗疲劳、耐腐蚀、质量轻、可设计性强等特点。历经多年技术攻关，已实现风扇叶片、

风扇流道板、风扇包容机匣等的装机应用，典型零部件如图2所示。主要改进方向是进一步提升复杂型面零件成形精度，完成符合性验证工作。

焊接及特种加工技术

摩擦焊技术。该技术具有接头综合机械性能好、工艺性强、质量稳定、适用异种材料焊接等特点。针对商用航空发动机的研制需求，国内科研院所已经完成了大吨位摩擦焊设备研制、压气机转子组件、

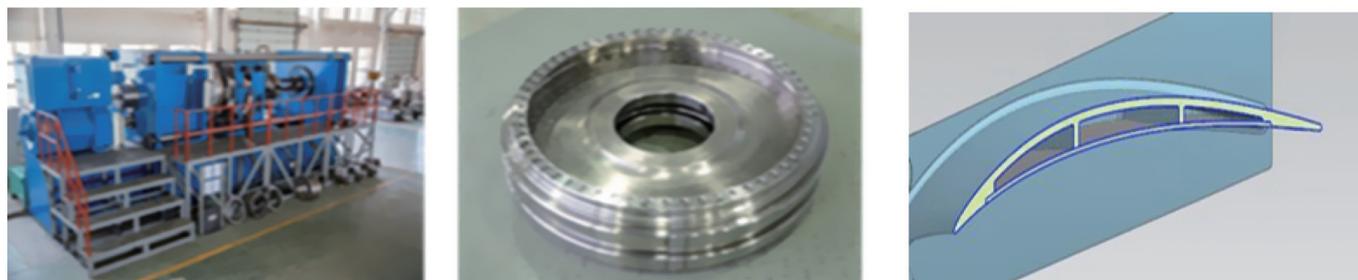


图3 典型的摩擦焊设备及零部件



图4 超快激光加工典型零部件

高压涡轮盘轴组件、空心OGV等试制及考核验证等工作，典型零部件如图3所示。后续工作重点是积累批量接头性能数据，进一步提高焊接尺寸精度和稳定性。

真空电子束焊接技术。电子束焊接具有接头性能高、焊缝热影响区及焊接变形小、工艺稳定等特点，已在静子组件、压气机组件、机匣组件等关键承力部件研制中获得应用。后续工作重点是围绕减轻质量要求，开展新材料、异种材料变截面结构的焊接，优化焊接工艺，减少焊接变形。

真空钎焊技术。主要技术特点是焊缝质量好、变形小，可用于复杂、精密结构件的批量焊接，已经应用于单晶涡轮叶片、燃油喷嘴、蜂窝封严等组件的研制。后续将进一步提高接头性能，实现减轻质量的设计优化是后续重点的改进方向。

精密电火花加工技术。电火花加工技术具有加工过程无机加应力、加工效率高等特点，特别适用于常规加工难以实现的细微孔、狭窄凹槽的加工。例如，叶片气膜孔、封严槽、蜂窝磨削等加工。其主要不足是加工表面存在重熔层及热影响区等缺陷，限制了进一步的推广应

用。后续工作重点是开展整体铸造叶片异形气膜孔高效自适应加工技术开发、双层壁叶片对壁击伤防护与控制等工作。

超快激光加工技术。超快激光加工技术具有加工效率高、无重熔层、无裂纹等特点。目前，已经实现热端部件涡轮叶片、燃烧室气膜孔的加工，典型零部件如图4所示。后续重点是开展带涂层异形气膜孔加工装备的国产化研制与应用工作，降低加工成本，提高加工效率。

精密数控加工技术

精密数控加工技术具有响应快、精度高、柔性好、质量稳定等特点。在商用发动机新结构、新材料加工方面，已经实现大量应用，如双级整体加工（见图5）、钛合金包边等难加工、大尺度、弱刚性构件的加工。后续重点是开展自适应数控加工技术，多轴联动与车铣复合数控加工技术，高精密切削数控加工专机、专线研制等工作，进一步提高加工效率，降低制造成本。

涂层制备技术

涂层制备技术在延长发动机寿命、提高性能可靠性、降低耗油率方面发挥着不可或缺的独特作用。热障涂层、封严涂层、耐磨涂层主要应用于涡轮叶片、燃烧室等关键部件的研制过程。存在的突出问题是涂层寿命低，难以满足商用航空发动机的研制要求。主要改进方向是开发更高耐温能力的新型热障涂层材料及工艺，推进大功率电子束物理气相沉积设备国



图5 精密数控加工典型零部件



唇口



油路适配器



焊接结构机匣

图6 特殊典型结构的工艺集成技术应用

产化,实现长寿命单晶叶片热障涂层设备自主保障,建立适用于商用发动机模拟环境的热障涂层考核验证平台,开展各类涂层性能的考核验证,逐步提高涂层寿命。

特殊典型结构的工艺集成应用技术

在商用涡扇航空发动机研制中,还有一类零件,具有尺寸大、结构复杂、壁薄、精度要求高的特点,超出国内现有发动机零部件加工能力范围。针对这一类特殊典型结构的研制需求,在研制过程通过联合国内优势研究院所开展工艺集成应用技术联合攻关,基本满足了型号阶段研制需要。例如,采用突破大尺寸双曲率非回转体变截面薄壁铝合金短舱唇口制造技术,该件最大轮廓超过2.5m,最小壁厚为1.6mm,面轮廓度要求1mm,厚度公差为 $\pm 0.3\text{mm}$;采用增材制造与精密数控加工完成大尺寸复杂内腔结构的油路适配器的研制;突破大尺寸薄壁焊接结构承力涡轮机匣制造技术等,典型结构如图6所示。后续工作重点是稳定工艺、提高效率、降低成本。

加速关键制造技术突破与

成熟的思考及建议

经过多年研制的迭代,我国商用涡扇航空发动机关键制造技术取得了长足进步,基本保障了项目研制的阶段需求。但是,对标适航认证、商业化的需求,关键制造技术与国际先进水平还存在不小差距。加之,在进一步减轻质量及优化方面的设计需求,还将给制造技术带来新的更大挑战。

为此,我国商用涡扇航空发动机研发坚持任务牵引、系统策划、聚焦瓶颈、迭代提升的总体思路,以系统工程理论、技术轨道理论、技术成熟度理论、先进工艺管理理论为技术支撑,充分挖掘工艺资源环境条件的潜力,立足自主、吸收借鉴、夯实技术基础,大力推进关键制造技术各专业学科的分类研究,不断提高技术成熟度。

中国航发商发结合型号分阶段研制进程,不断推进瓶颈环节技术措施与技改落地,支撑制造成熟度的不断提升,以制造体系保障能力提升作为主要评价指标,构建完善的管控平台,实现型号制造技术管理相关方法、工具、流程、标准、工程数据库等技术资源的有机关

联,加速制造技术突破、成熟,为型号研制提供坚实的关键制造技术保障。

结束语

制造技术是航空发动机研制的重要基础,航空发动机性能的提升以及新一代航空发动机的研制,越来越多地依赖材料和制造技术的进步。同时,在高性能航空发动机研制的迫切需求的牵引之下,也必将促进航空发动机关键制造技术获得新的突破,迈向更高水平。

航空动力

(李金声,中国航发商发“长江”项目总工艺师,研究员级高级工程师,主要从事商用航空发动机制造技术研究与管理工作)

参考文献

- [1] 冯南平,向巧,沈荣骏,等.航空发动机关键核心技术攻关组织策略研究[J].中国工程科学,2022,24(4):222-229.
- [2] 郭德伦,韩野,张媛.航空发动机发展对制造技术的需求[J].航空制造技术,2015(22):68-72.
- [3] 聂晶,杨瑾,童悦.大型民机发动机关键技术现状与发展趋势[J].航空制造技术,2012(21):34-37.