

# 商用航空发动机产品合格认证研究与实践

## Research and Practice of Component Proving for Commercial Aero Engine Program

■ 蒋明繁 韩秀峰 常建卫 雷蕾 王福海 / 中国航发商用航空发动机有限责任公司

商用航空发动机的高安全性和可靠性要求对产品制造质量提出了巨大的挑战，对于如何有效管控商用航空发动机全生命周期制造质量、保证产品完全符合设计要求，产品合格认证提供了可行的途径。

商用航空发动机产品的制造质量控制难度极大，由于制造链条长、工艺技术要求高、涉及工序多、控制要素多、影响因素复杂等特点，产品制造质量水平在满足商用航空发动机的高安全性和可靠性要求方面存在巨大挑战<sup>[1-3]</sup>。国际航空航天质量小组（IAQG）发布了《航空航天首件检验要求》（AS9102）标准，通过首件检验（FAI）对零组件等产品进行评估；国内军品型号项目也依据《首件鉴定》（GJB 908）标准，对试制的零组件实施首件鉴定。首件检验或首件鉴定的目的是提供客观证据，证明所有工程、设计和标准要求已被正确理解、考虑、验证并记录<sup>[4-5]</sup>。在具体实施过程中，还普遍存在对首件检验或首件鉴定的相关标准理解不深入、体系文件操作性差、开展时机不准确、目录识别不到位、过程管理不到位、鉴定验证不充分等问题<sup>[6-7]</sup>，往往“重结果、轻过程”，侧重于对零（组）件的产品特性的检验，而对于制造过程是否满足工程设计及相关标准规范的要求，乃至制造过程是否能够一致地、稳定地生产还缺少充分的验证，难以识别制造过程中的风险，直到转入批量生产

甚至交付客户、投入使用时才暴露问题，而此时再对产品或过程进行改进的成本难以承受，并可能导致客户不满意或安全事故。

产品合格认证旨在生产开始之前通过工程验证（ESP）全面评估制造过程是否满足工程、设计和标准的要求，并将此方法与首件检验结合，从制造过程和产品检验两方面进行评估，确保“过程”和“结果”均满足要求。通过产品合格认证，将质量要求融入产品设计和制造过程中，确认制造过程满足工程、设计和标准的要求，并确保顺利转入批量生产，减少生产过程中产生的废品、返工和让步接收，从而提高产品可靠性和客户的满意度。

### 产品合格认证概要

#### 产品合格认证的主要目的

产品合格认证的目的是主制造商通过对产品承制商（供应商及其子供应商）所承制产品的制造过程和产品质量进行控制和验证，以保证原材料、标准件、锻铸件和零组件完全满足设计意图、图样和标准规范要求。

#### 产品合格认证的方法

通过产品检验和工程验证，开

展产品合格认证。产品检验侧重于对产品特性的验证，对几何特性如尺寸公差等进行确认；工程验证聚焦于对制造过程的验证，对关键工艺如涂层、焊接、热处理等过程进行全面评估。

按照AS9102等标准的定义，首件检验是一项经策划的、完整的、独立的、文件化的检验和验证过程，用以验证规定的生产方法可生产出工程图样、工艺计划文件、采购订单、工程规范和/或其他适用的设计文件所规定的合格产品。零件、组件、装配件按照首件检验所形成的表单主要包括首件检验基本信息表、首件特性检验结果表、过程符合性表。

工程验证是在首件检验的基础上，通过在试片、模拟件或真实零件上开展工艺试验，进行破坏性试验验证，包括采用金相解剖等方法进行评估，确认是否实现了设计意图。工程验证所形成的文件主要包括工艺试验报告、工艺规程等。

#### 产品合格认证的类型

针对发动机的产品类型，对产品类型进行了细分，建立了7类产品合格认证类型，全面覆盖发动机各类产品，如图1所示。原材料为最基

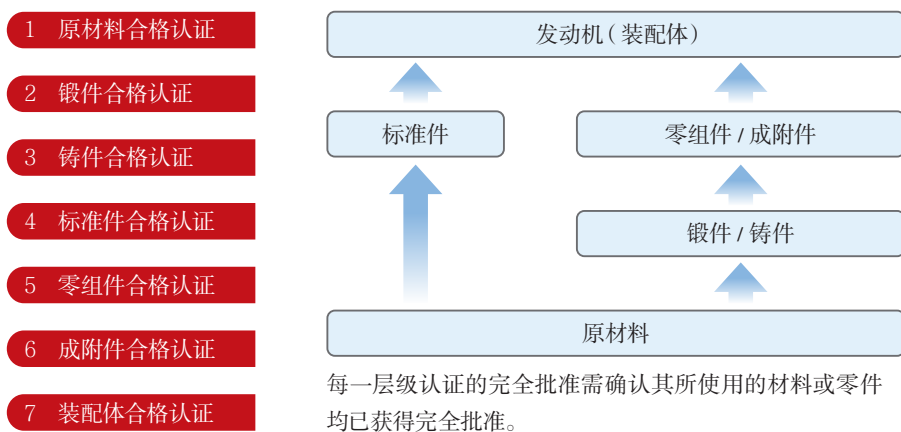


图1 产品合格认证类型及其逻辑关系

础的产品合格认证类型，原材料通过认证后才可启动锻件/铸件/标准件合格认证，锻件/铸件认证后才可启动零组件/成附件产品合格认证，零组件/成附件产品合格认证后才可启动装配体合格认证。通过每一层级产品的逐层充分验证，系统性保证整机产品完全满足设计意图。

## 产品合格认证流程

产品合格认证流程可以划分为12个步骤。首先是对产品进行分类，按制造过程是否包含关键工艺对产品分为工程验证件和非工程验证件，工程验证件需进行工程验证及首件检验，非工程验证件仅需进行首件检验。工程验证重点对关键工艺进行验证，主制造商在工程验证计划中明确关键工艺验证要求，包括具体的验证试验数量要求、检测要求，如金相检测、力学性能测试等。承制商确认工程验证计划后按要求采用试片或模拟件开展工艺试验，进行金相检验、力学性能测试等破坏性试验验证。主制造商通过评估工程验证数据包括制造记录（如流水卡）、主工艺规程、关键工艺规程、材料合格证明、构型确认报告、检

验检测计划等，确认对设计要求的符合性，工程验证批准后即对关键工艺进行固化。产品合格认证流程的12个步骤的具体描述如下。

识别工程验证件。主制造商的设计、材料、工艺专业部门根据工程验证件识别要求以及设计图样等输入，识别工程验证件。工程验证件被定义为含有功能特征或关键工艺产生某些特性，且不能通过无损检测或非破坏性直接测量的方法进行充分评估的零件；其他零件为非工程验证件。关键工艺被定义为对设计意图或材料的组织、物理、化学或电性能有影响，并且该影响通常无法通过非破坏性方法进行评估的工艺，如喷涂、热处理、焊接、喷丸等。

制订验证计划。主制造商的材料、工艺专业针对被识别的工程验证件，编制工程验证计划，针对工程验证件的各项关键工艺制定验证要求，并由设计专业会签。

确定产品合格认证初始承制商。主制造商的采购部门依据采购需求或分工流水确定产品合格认证初始承制商。

发布产品合格认证任务。主制造商按照发动机台份或批次的采购

需求，向承制商发布经设计专业会签的产品合格认证任务清单，以此作为承制商开展产品合格认证的技术输入。

审核承制商的质量体系资质和特种工艺资质。主制造商对承担产品合格认证任务的承制商的质量体系、特种工艺资质进行审核，体系认证和特种工艺认证是承制商开展产品合格认证的前提条件。对于原材料、锻铸件的合格认证，相关的理化检测应在第三方独立实验室开展。

确认产品合格认证任务。主制造商的采购部门依据相关合同管理程序，与承制商签署产品合格认证合同，双方对产品合格认证任务进行正式确认。

确认验证方案及要求。承制商对主制造商提出的工程验证和/或试验大纲要求进行确认，若关键工艺由次级承制单位承担，承制商应将相关的工程验证和/或试验大纲要求传递给次级承制单位。

开展关键工艺验证。承制商根据确认的工程验证和/或试验大纲要求，完成试样、试片或模拟件的试制及验证试验，并负责收集所有关键工艺的验证数据，确保验证数据的准确性和完整性。针对工程验证件的每项关键工艺验证要求，承制商都要开展工程验证试验，并提交相应的试验数据证明其符合性。

首件试制。承制商按照图样、订单、任务书及相关首件管理要求，开展首件策划并完成首件试制，并且对测量系统的重复性、再现性进行确认，以保证测量结果的可靠。用于首件检验的零件必须能代表同批及后续的生产过程，还需满足：材料、标准件、工程验证件生产过

程中的特种工艺的工艺规程应获得主制造商批准；首件及其后的批产件生产所用的原材料及下层级零组件或标准件均需要通过产品合格认证；检验方法应尽可能保持独立。

提交工程验证和产品检验的资料。承制商按照主制造商的设计、工艺、质量专业的要求完成工程验证和首件检验，收集并提交资料。在提交同槽、同炉试片及模拟件验证结果时，需保证同批次所有试片及模拟件验证结果均满足验证要求。针对材料和标准件合格认证，应按照预批准的过程控制文件（PCD）进行多批次生产及测试，确保生产批次数量满足标准和关键特性（KC）统计学分析的要求，或按工程验证要求提供多批次数据。按照相关的管理要求提交产品检验、工程验证资料，包括制造记录（如流水卡）、加工工艺规程、关键工艺规程、材料批准记录或材料合格证明、构型确认报告、检验/测试计划、检验/测试报告，以及其他工程验证计划中要求提交的验证数据等。

工程验证及产品检验资料批准。主制造商的设计、材料或工艺、质量专业部门审核承制商提交的工程验证资料、首件检验资料，根据评估结果批准相应的流程。主制造商的设计主管、材料或工艺主管、质量主管在批准产品合格认证流程时各有分工，并相互补充。设计主管主要负责产品特性的符合性、设计验证要求的符合性和其他设计关注特性的符合性；材料或工艺主管主要负责生产过程的符合性、材料或工艺验证要求的符合性、工艺资质的符合性和其他材料或工艺关注点的符合性；质量主管主要负责资料

完整性以及质量证明文件的符合性。对于带有关键特性的产品，应采用过程能力指数，包括过程能力/过程能力指数/过程性能指数（Cp/Cpk/Ppk）对关键特性进行评估。对于金属材料而言，Ppk计算样本量至少满足3炉30个样本；对于非金属材料，样本量至少为3批30个样本；对于标准件，样本量至少30个样本（每批不少于10个样本）。

合格产品目录（QPL）发布。主制造商对工程验证及首件检验资料批准后，将通过产品合格认证的承制商及产品信息纳入《型号合格产品目录》，并通报承制商。承制商也应从目录中采购所需的产品。

## 产品合格认证要点

### 原材料合格认证要点

原材料包括非金属材料、复合材料，以及用于生产零组件、锻件和铸件的板材、棒材、线材、带材、型材、粉末、合金锭等金属材料。

在主制造商的指导下，承制商需要制定材料合格认证试验大纲、

金属材料通用鉴定要求，明确测试项目、取样位置（见图2）、取样方向、试验设备、试验标准及参数、验收技术指标等。承制商编制的材料合格认证试验大纲应报主制造商批准。

承制商还需要编制PCD和检测方案并提交主制造商。PCD中的关键工艺参数及受控工艺参数应识别完整、准确，棒材测试方案及无损检测方案应符合试验大纲、技术标准要求。

供应商按PCD，进行多炉批材料的生产和检测。按相同工艺至少生产3炉（连续的合格批次），并按照批准的取样方案开展取样测试，按试验大纲要求在经过认可的第三方独立实验室进行理化性能检测，所有制造和检验过程记录要可追溯。

主制造商对材料合格认证结果进行评估和批准，从结果符合性和过程符合性两方面进行审查。结果符合性包括：所有技术指标满足试验大纲和材料标准要求；关键性能 $Ppk \geq 1$ ；锻铸件用原材料应完成典型锻铸件的工程验证。过程符合性

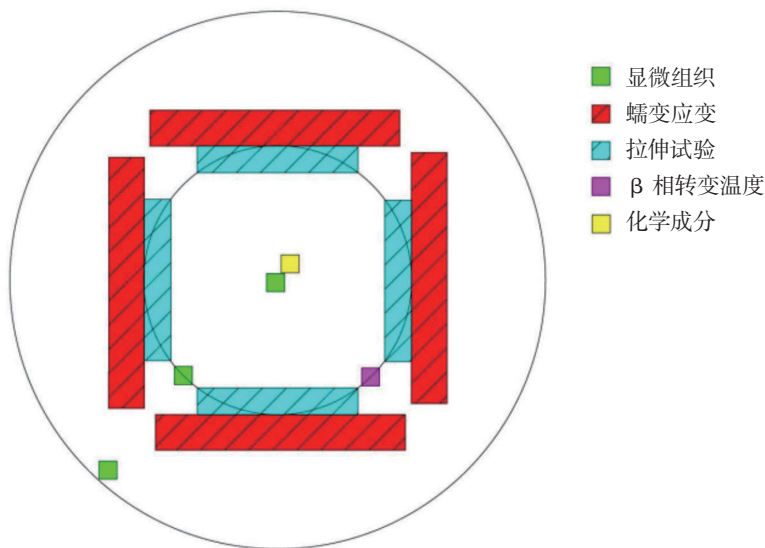


图2 棒材取样示意



包括：需求识别有效性，即流程、文件、标准输入有效；特种工艺资质、PCD及取样方案符合要求；制造工序及工艺参数符合PCD，记录可追溯；材料检测实验室资质、取样与试验符合要求。

### 锻铸件合格认证要点

锻件、铸件合格认证要点基本一致，以锻件为例进行说明如下。

主制造商基于设计要求，制定锻件的合格认证要求，包括对关键工艺如锻造、热处理等工艺验证要求，以及对锻件的解剖取样及测试要求，或某些特殊验证要求。

承制商需确认锻造工艺方案是否合理可行，并应通过翔实的数值模拟报告来证明可行性（见图3）。

承制商还应编制PCD，确认工艺卡中关键工序及工艺参数的完整、准确，确认锻件解剖测试方案、无损检测方案符合主制造商制定的锻件合格认证要求。

承制商开展关键工艺验证，对于某些重要的锻件产品，还需要开展锻造加热炉的炉温动态恢复试验。

承制商按照PCD，开展锻件首件试制，进行锻件尺寸检测和无损检测、试环力学性能测试等，验证

对锻件图的符合性，并按照解剖测试方案开展力学性能测试、金相检验，提交完整的数据资料，由主制造商的设计、材料、质量专业对承制商提交的数据资料进行审批。

### 零组件合格认证要点

主制造商制定零组件的合格认证要求，包括对关键工艺的验证要求，以及对零组件的检测要求。以热喷涂工艺为例，其关键工艺的验证要求规定了零件或模拟件的工艺试验要求，包括对邻近喷涂区域试片上的底层和面层涂层厚度进行测量，确认试片和零件不同区域的涂层厚度，对零件或模拟件横截面进行金相检查，以及涂层的结合强度、硬度检测等，只有满足各项测试要求后才能确定热喷涂的工艺参数。热喷涂的工艺参数应包括热喷涂电压、电流、气体压力、气体流量、送粉速率、零件预热温度、预热方法、冷却压力、冷却流、热喷涂喷枪与零件角度、喷涂距离、热喷涂喷枪与零件的相对移动（往返速率）、零件旋转速度、冷却空气喷嘴位置、遮蔽材料等。

承制商按主制造商的零组件合格认证要求开展关键工艺验证，采用试片、试环或模拟件等进行工艺试验，开展金相、力学、尺寸等检测，确定工艺参数，并提交工艺规程、参数卡和相关检测报告。

主制造商对关键工艺的工艺规程、检测数据进行审查评估，确认满足相关设计图样、工艺标准的要求。

承制商按照批准的工艺规程开展首件试制，进行零组件的首件检测，确认检测结果对于设计图样的符合性。必要时还要开展测量系统分析，确保测量结果的可靠性。

## 产品合格认证后的持续管控

产品合格认证完成后，表明承制商有能力生产出满足设计意图的产品，但还不能表明后续的生产过程中能始终加工出合格产品。为了能够持续、稳定地加工出始终符合型号设计的零件，还需要开展产品合格认证后的持续管控，保持和维护产品合格认证的状态，保证已认证的制造过程和产品质量的有效性。

通过对技术状态变更的严格控制，保持产品合格认证的有效性；通过产品一致性评估，表明产品特性/指标满足稳定性要求；通过批量生产准备成熟度评估，确认承制商建立了满足商用航空发动机批量生产的质量管理体系，保证发动机制造商按照经局方批准的型号设计进行持续、批量生产，满足局方对生产许可证的审定要求。

### 产品合格认证状态保持与维护

产品合格认证状态受设计、工艺、材料的技术状态和承制商的影响。当产品的标准、图样、承制商或工艺更改时，应对更改进行控制，规定更改的控制和贯彻的要求，包括设计更改、超过2年未生产、供应商或次级供应商变更、工艺方法变更、工序变更、生产场所变更等。例如，承制商发生更改后，应重新开展产品合格认证流程；产品的工艺需要更改时，承制商应分析工艺更改是否影响关键工艺，以确定发起流程的类型属于关键工艺更改还是一般更改。

### 产品一致性评估

通过数据驱动工艺优化，采用Cpk、统计过程控制（SPC）、Cp等统计分析工具对制造过程数据进行分析，掌握产品制造过程的波动情

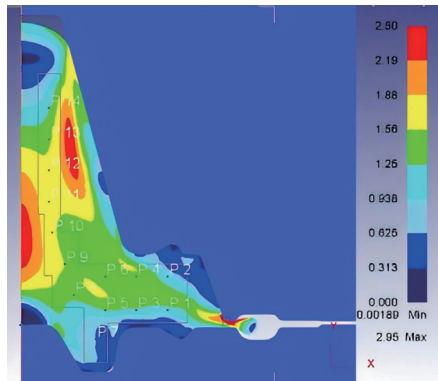


图3 锻造过程数值模拟

况，确保产品制造过程的稳定性和产品质量的一致性，并持续提升。基于产品验收要求，可以制定对制造过程的控制范围。当偏差仅在控制范围内，表示制造过程是受控的；而当偏差超出控制，则表示制造过程是失控的，需要识别这些异常波动的原因，采取措施，使制造过程回归到稳定。

对于有关键特性要求的产品，应对关键特性采用过程能力指数进行评估和监控，并持续提升。一般要求Cp/Cpk/Ppk应大于1.3以上，表明制造过程比较稳定可靠，达到了较高的质量控制水平。

### 批量生产准备成熟度评估

项目从研制转入批量生产阶段，是实现商业成功的必经之路。商用航空发动机批量生产的必要条件之一就是获得民航管理机构的生产许可证(PC)。中国民用航空局按照《生产批准和监督程序》(AP-21-AA-2022-31R1)要求进行生产许可审查，要求申请人建立并能够保持一个质量控制系统，使得发动机制造商按照经局方批准的型号设计进行稳定可靠的生产。

生产许可证的审查要求包括对人员能力和资格、供应商控制、制造过程控制、检验和试验、质量记录的控制等，每个细节都必须有章可循、有据可查，要求申请人严格按照程序组织各个生产环节，确保全流程可追溯、全过程受控。

开展批量生产准备成熟度评估，就是要从人、机、料、法、环、测等各个因素评估批量生产准备程度，包括项目管理、供应链、质量、设备工具、产能、工艺过程，旨在进一步识别批量生产前可能存在的问

题或短板，全面落实适航法规对制造过程管理的要求，确保建立了符合适航要求的民机制造过程管理体系，支撑生产许可证取证。

### 产品审核

通过开展周期性的产品审核，对承制商进行监督，确保承制商的制造过程控制和产品验收计划可以保证持续生产合格的产品。产品审核的要点包括设计更改的贯彻、制造质量计划的制订与落实、工艺文件的控制、产品检验数据、次级供应商的质量控制、特种工艺控制、关键工艺控制等。

纳入技术批准目录的产品，在批准后的12~24个月内需要进行产品审核由主承制商的设计主管、质量主管、材料主管、工艺主管等组成的审核组进行审核。在同一承制商进行产品审核，可以基于该承制商生产的产品选择一种或几种能够代表生产工艺的产品进行。基于交付的产品质量情况，以及对过程能力、测量方法的分析，筛选风险高的产品进行审核，并要求承制商提供资料文件、配合开展工件审核。

### 结束语

在商用航空发动机项目研制中，通过开展产品合格认证，将质量要求融入产品设计和制造过程中，自底向上逐级开展原材料、锻件/铸件、零组件、标准件、成附件、装配集成的合格认证管理，确保制造过程经过充分验证、制造结果满足设计意图。此外，在产品合格认证过程中，还实现了设计、制造专业更加紧密的协同，基于对制造过程的深入理解，对产品设计进行了优化，提高了可制造性。

通过产品合格认证，对关键工艺进行充分验证，固化了关键工艺参数，建立了制造基线，系统构建了国产商用航空发动机从原材料到整机装配的合格产品目录，牵引提升了全产业链的制造核心技术能力和制造过程管理水平，达到了有效管控制造过程、保证产品制造质量的目标，为商用航空发动机项目研制提供了有力的支撑。

**航空动力**

(蒋明繁，中国航发商用航空发动机有限责任公司副总经理，高级工程师，主要从事生产管理、供应商管理、人力资源管理工作)

### 参考文献

- [1] 尹泽勇,秦亚欣,李建榕,等.新时期我国民用航空发动机自主发展战略研究[J].中国工程科学,2023,25(5):185-191.
- [2] 金伟.探究民用航空发动机创新与开放发展之道[J].航空动力,2019,9(4):6-10.
- [3] STEFFENS K,WILHELM H. Next engine generation: materials, surface technology, manufacturing processes, what comes after 2000? [R]. MTU Aero Engines Report, 2003.
- [4] 黄海鸥.“首件鉴定”及“首件检验”应用分析[J].航空标准化与质量,2019,296(5):33-37.
- [5] 屈小明.飞机航空产品首件检验问题与对策浅析[J].科技与企业,2014,263(14):58.
- [6] 张文斌,辛明超.谈航空机电设备的首件鉴定[J].质量与可靠性,2024,231(3):9-11.
- [7] 黄艳松.装备制造过程首件鉴定工作的问题剖析[J].新技术新工艺,2020,390(6):78-80.