

引用格式: 王永明, 何歆, 张弓, 等. 基于国情与实践的民用航空发动机材料/工艺适航审定技术路径[J]. 航空材料学报, 2025, 45(6): 81-88.  
WANG Yongming, HE Xin, ZHANG Gong, et al. Path of airworthiness certification for civil aero-engine materials/processes based on national conditions and certification practices[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(6): 81-88.

## 基于国情与实践的民用航空发动机 材料/工艺适航审定技术路径

王永明, 何歆\*, 张弓, 冯建文, 甄博, 郭家琛

(中国民用航空适航审定中心, 北京 100102)

**摘要:** 材料/工艺是制造业发展的基础, 尤其对于民用航空产品, 其设计、验证以及适航审定离不开材料数据的支撑。尽管国内材料/工艺技术近年来取得显著进步, 但受限于材料体系不完善、历史数据积累不足等问题, 民用航空发动机材料适航审定仍面临不少困难和挑战。当前主要矛盾集中体现为: 民机适航对材料/工艺的高要求与国内材料体系支撑能力不足、问题解决时间紧迫之间的冲突。本文通过解析 CCAR33.15 等材料适航规章核心要求, 对比国内外材料/工艺适航审定现状, 梳理出我国在材料规范统计性验证、过程管控机制、设计许用值生成及特种工艺验证等方面的差距; 结合审定实践中的主要问题, 提出基于国情的技术方案——以国家协同创新机制为依托, 构建“规章解读-体系协同-多方联动-技术协同-动态适配”的五维实施路径, 通过型号项目驱动企业材料体系完善, 以设计需求为导向精准获取验证数据。实践表明, 该方案已推动完成 600 余项材料工艺实验、建立 100 余份材料规范及 1000 余条设计用性能曲线, 可有效支撑型号合格审定工作。研究成果为完善我国民用航空发动机材料/工艺适航审定管理、推动自主材料应用提供了技术参考。

**关键词:** 适航; 民用航空发动机; 审定实践; 材料/工艺; 技术路径

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000157

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2025.000157

中图分类号: V250; V262; V263

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)06-0081-08

## Path of airworthiness certification for civil aero-engine materials/processes based on national conditions and certification practices

WANG Yongming, HE Xin\*, ZHANG Gong, FENG Jianwen, ZHEN Bo, GUO Jiachen

(Airworthiness Certification Center, CAAC, Beijing 100102, China)

**Abstract:** Materials and processes form the foundation of manufacturing development, especially for civil aviation products, whose design, verification and airworthiness certification are inseparable from the support of material data. Despite significant progress in domestic material and process technologies in recent years, material airworthiness certification of civil aero-engines still faces the challenges of insufficient verification data due to an incomplete material system and inadequate accumulation of historical data. The current primary contradiction is manifested as the conflict between the high requirements of civil aircraft airworthiness for materials/processes, the insufficient support capacity of the domestic material system, and the urgency of solving problems. This paper analyzes the core requirements of airworthiness regulations such as CCAR33.15 “Materials”, compares the current situation of domestic and foreign material/process airworthiness certification, and identifies gaps of China in material specification statistical validation, process control mechanisms, design allowable value generation and special processes. Combining practical issues in certification practice, a technology scheme based on national conditions is proposed. Relying on the national collaborative innovation mechanism, a five-dimensional implementation path of “Regulation interpretation-system collaboration-multi-party linkage-

technical synergy-dynamic adaptation” is constructed. It promotes the improvement of enterprise material systems through type projects and accurately acquires verification data oriented toward design requirements. Practice shows that this scheme has promoted the completion of over 600 material and process tests, established more than 100 material specifications and over 1000 design performance curves, effectively supporting the type certification work. The research results provide technical references for improving the management of material/process airworthiness certification of civil aero-engines and promoting the application of independent materials.

**Key words:** airworthiness; civil aero-engine; certification practice; material/process; technical path

航空发动机设计、制造和验证,均离不开底层材料数据和工艺方法的支撑。为保证使用的材料/工艺能够满足航空发动机需求,并具有足够高的稳定性,作为型号设计的一部分,在适航规章及程序中提出对材料/工艺的明确要求<sup>[1-2]</sup>。

由于国内民机研制起步较晚,满足民机适航要求的材料体系尚不完善,验证基础较为薄弱,历史验证信息缺乏系统化积累,这些问题导致在开展民用航空发动机型号合格审定时,申请人往往因缺少能够作为输入以支撑各类验证活动的实际材料数据,而不得不规划大量验证工作以弥补数据上的缺失。材料体系的完善、材料/工艺数据的获取,必然会在技术难度、人力资源、资金成本、时间成本等方面带来较大挑战。

材料/工艺的审定模式若不结合国内实际情况进行优化,将会制约具有自主知识产权的国产材料在民用航空产品上的应用,也可能阻碍多个型号合格审定项目的进展。因此,本工作对适航规章进行详细解读,准确识别其实质要求,并根据国内材料体系现状及审定实践中发现的主要问题,将发动机材料适航审定思路中国化,提出适用于我国国情的材料/工艺适航审定技术新路径和新模式。

## 1 材料适航审定要求解析

当前,中国民用航空局(CAAC)、美国联邦航空局(FAA)、欧洲航空安全局(EASA)等多个审定局方通过发动机规章(CCAR33/FAR33/CS-E)提出对材料及制造方法的相关要求。从条款内容上看,三个局方对材料适航审定的实质要求基本一致<sup>[3]</sup>。中国民用航空局有关发动机材料条款原文如下<sup>[4]</sup>:

### 33.15 材料

发动机所用材料的适用性和耐久性必须满足下列要求:

- (a)建立在经验或试验的基础上;
- (b)符合经批准的规范(如工业或军用规范),

保证这些材料具有设计资料中采用的强度和其他性能。

以上内容可以理解为:民用航空产品申请人通过材料规范保证材料具有型号设计所需的性能,并表明产品所用材料的适用性、耐久性和稳定性能够实现所制部件的预期功能;申请人应在经验、实验、以及经批准的规范基础上,确定材料设计值,使因材料或制造分散性而引起结构破坏的概率降至最小。FAA通过AC33-2B、AC33.15-1、AC33.15-2、AC33-11等咨询通告对条款符合性验证思路进行指导<sup>[5-8]</sup>,EASA也在AMC E 70中明确了关于铸造件、锻造件、焊接结构和焊接件相关材料/工艺验证要求<sup>[9]</sup>。CAAC于2024年5月20日发布《航空发动机审定》咨询通告(AC-33-AA-2022-01R1),给出局方可接受的符合性方法<sup>[10]</sup>。根据对条款实质要求的梳理,结合多个局方发布的规章支持性文件可知,申请人在开展发动机材料适航验证工作时,对选用的材料/工艺规范、材料、设计用数据、制造方法等方面都需要开展工作表明符合性。可参考的材料条款符合性验证路线如图1所示。

## 2 国内外材料适航审定现状

### 2.1 国外发动机材料体系建设及材料适航发展现状

国外主流适航当局和主要工业企业在民用航空产品适航管理方面积累了丰富的经验。欧美各大航空发动机公司,如通用电气(GE)、普·惠(PW)、罗·罗(RR)、透博梅卡(TM)等,均形成了完整的且获得FAA、EASA认可的包含材料牌号、材料标准、工艺规范、材料数据、材料供应商等在内的材料体系。这些数据在欧美数据积累机制下获得形成数据库,且随着欧美民用发动机的长期系列化发展不断壮大<sup>[11]</sup>。其中,属于型号设计资料的技术资料也随着产品获得型号合格证得到了局方的批准,这些经批准的技术资料具有较强的继承

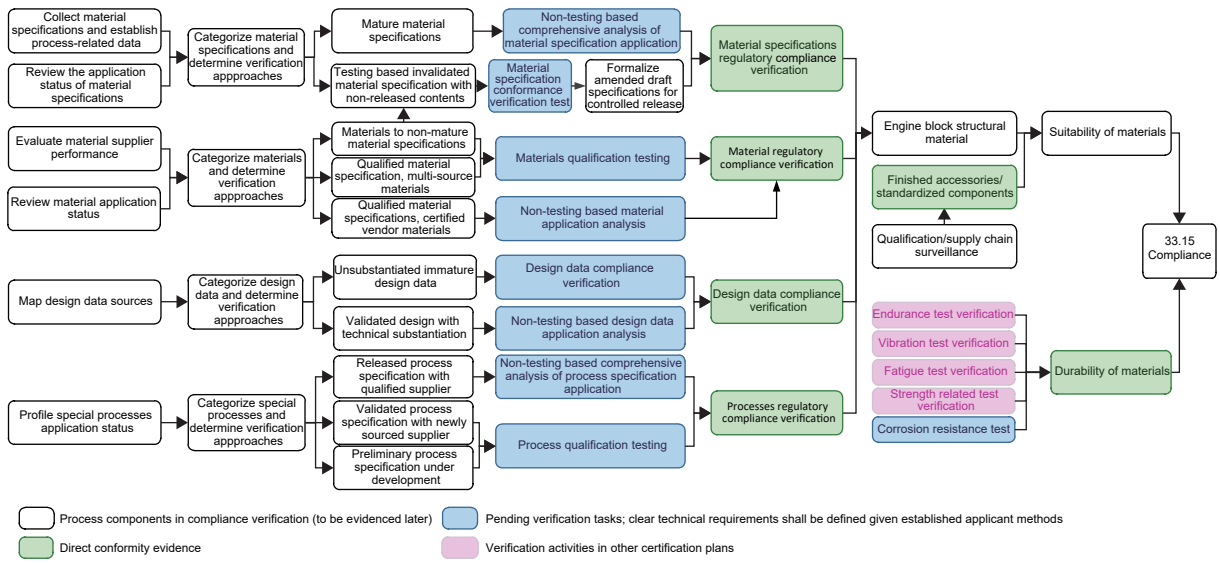


图 1 材料条款符合性验证路线

Fig. 1 Compliance verification roadmap for material requirements

性,大大减少了后续型号的验证成本。

在规范建立方面,各主机厂逐步建立了与产品相配套的材料和工艺规范体系,对材料和工艺规范中技术指标和工艺参数的合理性和适用性进行了验证,可确保这些规范能够实现对产品材料性能的全面控制。由于这些规范中的要求建立在实验验证基础上,且由各主机厂控制,因此其专用性、配套性、严谨性、可控性较好,随着产品类型的开发及材料性能的优化,这些规范日趋完善,适用范围也越来越广。

在材料合格鉴定方面,为确保材料制备过程符合经批准的规范,材料加工中的关键参数得到有效控制,从而降低材料性能分散性,各主机厂均已建立一套科学合理的材料合格鉴定技术要求和评判方法,形成严格的材料合格鉴定程序以对潜在的材料供应商进行管控。

在材料设计用数据方面,根据型号设计需要,各主机厂结合规范的建立及材料合格鉴定过程,进行了大量的材料性能测试,根据结构设计准则及不同部件对材料的性能需求,采用不同的处理方法获得材料设计用数据,从而提供可充分表征材料实际性能水平的设计输入。

在工艺方面,各主机厂也基于实验验证建立了大量的工艺规范,并注重对供应商的培育与管理,将工艺规范要求传递到供应商的工艺规程,通过严格的工艺鉴定、定期或不定期现场检查保证工艺的可控和性能数据的稳定。

总体来说,欧美航空工业随着百年的发展,在航空材料方面拥有了雄厚的工业技术基础,已形成

较为完备的材料体系。各主机厂通过对材料的充分验证和数据积累,形成了自主材料数据库以在选材、设计及验证时使用。在型号合格审定项目中,由于欧美航空发动机型号合格证申请人尽量选用成熟的材料和工艺,大大降低了材料适航符合性验证工作量,且由于建立了成熟并经局方认可的材料/工艺体系,针对新材料新工艺的验证已成为各申请人的“实验室级”项目,其形成的材料级实验大纲/报告等文件不会作为符合性验证资料在符合性检查清单中体现,而是作为申请人自身体系的一部分进行内部管控。

### 2.2 我国发动机材料体系建设及材料适航发展现状

长期以来,我国航空发动机设计研制以军事需求为导向,所用材料多基于军机材料并形成军机材料体系。对标民机材料适航审定要求,军机材料体系在验证流程完整性、性能稳定性及历史数据追溯性等方面存在差异。

近年来,随着国内工业界对民机适航审理解的深入,“材料规范建立过程不清晰”“旧规范更新滞后”“材料供应商管控不足”等挑战逐渐显露出来。多家主机厂已意识到,现有材料体系及验证模式无法满足民用航空发动机发展需求,影响产品安全性与经济性,亟须建立系统的材料适航体系,相关的材料适航验证规范、合格鉴定、数据处理及供应商管控等环节。

### 2.3 存在的差距

我国发动机材料适航审定与国外的具体差距主要体现在 4 方面。

#### (1) 材料规范未基于统计方法建立及验证

材料规范是定义型号选用材料性能要求的核心依据。为便于管控,国外主机厂结合本国生产制造水平及设计需求制定企业标准,标准中的指标通过大量实验数据及统计分析确定,确保技术指标的科学性与可操作性。FAR-33 与 CS-E 作为欧美航空工业体系的产物,其条款架构和技术规范均深入当地成熟的产业生态,能够有效支撑航空发动机适航审定工作。我国早期航空材料来源复杂,材料及标准体系呈多样化。仿制过程中,常直接翻译转换国外材料标准,并根据需求进行适应性删减或修改,部分修改缺乏科学依据及信息记录,难以证明修改后的规范符合民机材料适航要求。

航空发动机作为典型的高可靠性系统,其审定的本质是“设计-制造-验证-运维”全链条的协同过程。若无法建立本土工业特征的数据闭环和符合性验证体系,将难以实现从技术引进到自主发展的良性循环。这种结构性矛盾不仅制约着我国航空动力产业的技术突破,更可能形成“标准依赖型”发展路径,进而影响其在国际航空产业链中的战略主动权。

#### (2) 缺乏基于过程管控机制的材料合格鉴定

为保证材料稳定满足规范要求,供应商需建立过程管控机制,编制材料生产过程控制文件(PCD)、识别关键工序与参数、固化生产过程,按要求生产并开展质量一致性评估。国内材料相关单位对民机材料适航的理念、方法、实施流程及实验验证要求的认知尚未统一,部分单位的材料加工过程管控机制尚不完善,与主机厂设计保证体系及质量控制系统存在差异,导致主机厂难以有效管控供应商的生产秩序和冶金质量。

#### (3) 缺乏设计许用值生成准则和处理方法的系统研究

材料力学性能(如材料强度)数据是结构分析、设计和寿命估算的基础,是结构完整性的重要环节<sup>[12]</sup>。材料强度性能需基于大量实验数据,包括常规力学性能、应力疲劳性能、应变疲劳等,统计得出反映真实性能的设计值。国外主机厂均制定了设计性能数据表达准则和规范的测试程序<sup>[13]</sup>,形成了设计用数据多样性及保障产品安全性的设计理念。

从技术维度分析,表明对现行规章的符合性高度依赖工程数据支撑。这些技术要求在欧美国家通过数十年系列化产品迭代已形成较为完备的数据积累机制,其航空工业体系持续产生的材料工程数据为适航审定提供了可靠支撑。国内航空发动

机设计用材料性能数据主要来源于《航空材料手册》《高温合金手册》等文献。部分数据来源追溯性不足、来源复杂<sup>[14]</sup>,且对应的材料规范已多轮更替;同时,手册中部分数据存在测试子样数量不清晰、无可靠度要求等问题,难以满足民机材料适航要求。

#### (4) 特种工艺规范符合性验证经验不足

材料最终性能与其加工工艺密切相关,尤其是特种工艺。国外发动机主机厂通过多年生产制造,开展了大量特种工艺参数研究及实验验证,形成完善、可操作性强的特种工艺规范。

与国外相比,国内特种工艺规范存在与材料规范类似的问题,缺乏实验验证基础,尤其忽视边界要求的验证;此外,国内特种工艺规范建立过程中参考来源多样,存在颗粒度不统一、要求不匹配的问题,易出现过严过松的现象。

### 3 审定实践中的主要问题

在民用航空发动机型号合格审定实践中,材料/工艺适航验证工作面临诸多现实挑战,其中“材料/工艺验证工作量庞大,难以在既定取证周期内完成”是各型号申请人普遍反馈的核心风险点。该风险虽不涉及根本性技术瓶颈,却直接影响项目推进效率,成为制约审定工作开展的关键屏障。

从我国工业界实际情况来看,当前材料/工艺体系与民机适航要求尚有差距。材料数据积累工作本身具有高资源消耗、长周期回报、多产业链层级协同的特点,在缺乏持续资金支持的前提下,工业界一方面难以统筹协调上下游企业,针对材料体系建设的路线达成共识,导致协同推进机制不畅;另一方面,企业开展材料验证工作的内生动力不足,倾向于沿用既有材料及历史数据进行型号设计。然而,这些历史材料信息在数据完整性、性能稳定性及追溯性等方面,往往无法充分满足民机材料/工艺适航审定的严苛要求,形成沿用旧数据存在合规风险,开展新验证面临资源约束的两难局面。

在上述背景下,国内多个重点发动机型号项目中,申请人不得不规划大规模材料/工艺验证实验,以支撑后续部件级、系统级及整机/核心机级验证工作。但材料/工艺数据作为产品设计与验证的基础性输入,若在审定前期投入过多时间与资源,将直接延缓型号合格审定的整体进度。更严峻的是,若验证过程中发现材料性能不达标,可能导致前期

已完成的符合性验证活动失效,甚至引发发动机结构、强度、气动及性能等核心设计环节的颠覆性调整,产生巨大的沉没成本。

与此同时,在材料体系尚未完善、工业界材料适航验证经验欠缺的现状下,审查方需投入大量精力对各型号申请人提供规章要求指导,解读适航规章对材料体系的要求,引导工业方单位结合自身实际开展材料/工艺验证,并通过审查活动进行确认,这不仅增加了审定系统的工作负荷,也在一定程度上影响审查效率。

综上所述,当前我国民用航空发动机材料/工艺适航审定实践中,民机适航对材料/工艺的高要求与国内材料体系不完善、问题解决时间紧迫之间的矛盾已成为亟待解决的主要矛盾。在民机产业快速发展、型号产品持续增量的背景下,如何通过优化审查模式、统筹资源配置,在保障安全底线的前提下提升材料/工艺适航验证效率,成为审查方与工业界需要共同攻克的实践课题。

## 4 发动机材料/工艺适航审定技术方案

### 4.1 技术框架构建

近年来,随着民机产业发展及工业界对适航认知的深化,适航规章的强制性要求逐渐成为统一材料适航理念、联通上下游单位、推动材料体系建设的关键纽带。审查方、申请人、材料供应商、测试单位、科研院所等多方协同,结合型号合格审定项目补齐材料短板,以共识为基础、以最优方案获取材料数据,成为材料/工艺体系建设的必由之路。

适航审定中心作为我国适航审定技术核心力量,已形成满足多类型民用航空产品适航审定需求的“1+6”组织机构布局,圆满完成C919飞机、AG600飞机、WZ16发动机<sup>[15]</sup>、AEC2.0L发动机<sup>[16]</sup>、JL-4A/1螺旋桨等产品的型号合格审定任务。结合发动机材料适航的主要矛盾及实际问题,参考多类型产品审定实践,探索形成符合国情的发动机材料适航技术方案,其核心在于:依托协同创新机制,统一发动机材料适航技术理念,整合多方资源形成合力;以型号项目为载体,协助工业界构建并完善企业内部材料体系;以设计需求为导向,明确材料验证边界,实现材料数据的精准表征与获取。

### 4.2 技术实施路径

对标“两业融合”及民航高质量发展要求,在

发动机材料适航技术方案框架下,构建多维技术实施路径,强化适航审定与航空产业、材料产业的技术融合,如图2所示,统筹规章要求、审定队伍、申请人队伍的协同发展,提升服务的高效性与现代化水平。

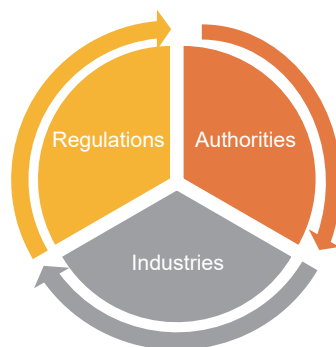


图2 规章、审定方、工业方协同发展  
Fig. 2 Collaboration between regulations, authorities and industries

#### (1) 规章技术解读与审定能力协同建设

坚持“条款衡量、数据说话”原则。审定队伍作为审定要求的传递者,需要持续开展规章解读研究、国外规章修订跟踪、新技术跟进、指导性文件制定修订等工作,深化对规章及安全本质的认知,将技术要求精准传递至工业界,做到规章解读“精准”而“不偏离”,要求传递“清晰”而“不模糊”,确保规章解读的准确性与一致性,要求传递的清晰度与确定性。在此基础上,优化适航审定技术和政策应用,提升审查效能,实现政策运用的严谨性与灵活性统一<sup>[17]</sup>。

#### (2) 审定中心系统专业协同机制构建

当前适航审定中心系统为多中心分布模式,各中心分别组建审查组按职责分工开展不同类型民机产品审查。因此,在持续开展规章解读的同时,更需进一步加强适航审定专业统筹,统一对材料适航要求的技术认知,通过审定经验共享、方法协同、标准统一形成共识;依托人员交流、工作联动、跨产品类型交叉审查等机制,实现审定能力的整体提升。

#### (3) 审定方与申请方技术协同模式创新

深化与申请人的“五个协同”,明确材料/工艺适航验证的技术目标与实施路径,聚焦关键问题形成共识。通过联合开展技术攻关、共享实验数据资源、共建验证方法体系等方式,构建基于信任的协同机制。采用基于风险的介入模式,重点介入限寿件、新材料/工艺应用等关键领域提前介入,对成熟材料/工艺简化审查程序,在保障安全的同时减少

对项目进度的影响。

#### (4) 申请人技术协同体系构建

适航审定能力需要在互相学习借鉴、合作共赢中不断提升。欧美百年民航发展史已经证明, 申请人之间只有求同存异, 才能共同发展。例如虽然 GE、RR、PW 三者在设计理念方面存在明显不同, 但在各自材料/工艺体系建设上却又有很多相似之处, 国内不同申请人队伍之间也需要加强经验学习、促进数据共享, 以构建涵盖上下游多层级的材料体系为目标, 提升产业整体适航能力。

#### (5) 规章演进与工业实践的协同适配机制

适航审定要求在一定程度上反映人类在当前科技水平下对共同保障航空安全的理性认识, 适航规章的修订需要基于工业实际基础。型号合格证申请人作为民机型号产品设计制造的主体, 需要正确认识规章修订、项目成功、企业发展之间的紧密联系, 系统梳理型号研制中的材料/工艺技术经验, 为规章修订提供实践依据, 形成“实践-标准-再实践”的良性循环, 推动适航要求与工业技术水平的协同提升。

### 4.3 技术应用成效

近年来, 基于上述技术方案及实施路径, 适航审定中心在上级机关单位的指导下, 联合工业方、科研院所等多方单位在材料适航领域开展了系列实践, 取得显著技术成效。

(1) 发挥举国体制优势, 统一发动机材料适航验证技术理念, 聚各方合力同向发力。适航审定中心坚持推进审定中心系统统筹, 并积极与工业方、科研院所、材料供应商单位等开展合作, 通过技术交流及规章与技术文件制定修订工作, 统一对发动机材料适航的认识, 发动机材料适航要求及验证思路已逐步清晰。在多方共同努力下, 适航审定中心已支持中国民用航空局发布咨询通告《航空发动机审定》(AC-33-AA-2024-01R1), 形成对“材料”等发动机适航审定规章条款的符合性验证思路建议。此外, 适航审定中心也已编制发布《民用航空产品新材料适航审定技术说明》(CTN-MULT-002-R0)、《民用航空产品新工艺适航审定技术说明》(CTN-MULT-003-R0)、《成附件材料和工艺审定技术说明》(CTN-MULT-004-R0)、《标准件审定技术说明》(CTN-MULT-005-R0)、《民用航空发动机增材制造相关材料及工艺审定技术说明》(CTN-33-033)、《关于复合材料风扇叶片使用退化、制造分散度、最小材料属性以及环境影响审查的技术说明》(CTN-33-005-R0)等多份

材料/工艺相关指导性文件<sup>[18-23]</sup>, 为材料适航工作思路提供技术指导。

(2) 以型号项目为依托, 协助工业方构建和完善企业内部材料体系。型号审查组与申请人材料团队在型号合格证申请前便着手搭建材料适航验证框架, 详细规划工作思路, 直面材料工艺技术、审定资源、验证成本、项目进度等方面带来的风险和挑战。在正式取证过程中, 全面铺开材料工艺实验和分析工作, 共完成 600 余项材料工艺实验; 建立 100 余份材料规范, 同步识别并修正多份以往材料规范中存在的问题; 完成对几十家材料供应商涵盖型号所用多品种规格的材料合格鉴定, 引领供应商构建满足民机要求的、符合国际发展趋势的材料体系; 详细梳理几十份特种工艺规范的历史验证信息, 分级分类进行考核并实现工艺鉴定全覆盖; 形成 1000 余条设计用材料性能曲线, 并对其稳定性进行充分评估, 保证具有设计资料中采用的强度和其他性能, 支撑型号设计及验证; 基于风险创新建立“双全介入”原则(限寿件材料全介入、前期材料验证全介入), 在保证安全的前提下减少审查介入对项目进展的影响, 成功推动企业构建符合民机要求的材料/工艺管控体系。

(3) 以设计需求为牵引, 厘清材料验证范围, 精准获取材料数据。在某型号审定项目中, 审查组与申请人在项目前期开展“设计需求-验证项目”映射分析, 及建立“自问自答”模式, 全面梳理材料/工艺应用情况, 逐条确认型号设计选用的材料/工艺信息、关键部件所用材料/工艺、尚未完全成熟的材料/工艺、验证工作量统计、实验验证安排、分析验证安排等多方面信息, 从设计需求出发, 制定详细的工作计划, 并随研制进展滚动更新, 以获得型号设计所必须的材料数据。通过这些工作的实施, 该项目材料适航工作按计划精准推进, 获得的数据有力支持了整体型号设计及验证开展。

## 5 结束语

通过解析适航规章要求、对比国内外发展现状、梳理审定实践问题, 目前存在不足及解决策略如下:

(1) 通过系统解析 CCAR33.15 等适航规章核心要求, 对比欧美成熟体系与我国发展现状, 明确了我国民用航空发动机材料/工艺适航验证的核心差距: 材料规范缺乏统计性验证基础、过程管控机制不完善、设计许用值生成方法不系统、特种工艺

验证经验不足等。这些差距导致国内材料体系难以满足民机适航对数据完整性、性能稳定性及追溯性的严苛要求,需针对性构建适配国情的解决方案。

(2)基于国内审定实践提炼出材料适航核心矛盾为“民机适航高要求与材料体系不完善、解决时间紧迫之间的冲突”,其具体表现为验证工作量过大且周期紧张、产业链协同机制不畅、历史数据适用性有限等现实挑战。针对该矛盾提出的技术方案,通过“行业协同创新、型号项目依托、设计需求牵引”的三维框架及五维实施路径,在实践中已展现出显著成效,如推动完成600余项材料工艺实验、建立100余份材料规范、形成1000余条设计用性能曲线,有效支撑了型号审定工作。

(3)形成的适航审定路径方案,既保持与国际适航安全要求的一致性,又充分适配我国材料工业基础与民机发展阶段,为后续民用航空发动机材料/工艺适航审定提供了可操作的技术框架。其核心价值在于通过差异化验证策略与协同机制设计,平衡安全底线与产业发展实际,对推动工业界构建自主材料体系、提升适航符合性验证能力具有重要指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 民用航空产品和零部件合格审定规定: CCAR-21-R5[S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2024: 32.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China: CCAR-21-R5[S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2024: 32.
- [2] 中国民用航空局. 型号合格审定程序: AP-21-AA-2023-11R1[S]. 北京: 中国民用航空局, 2023: 41.  
Civil Aviation Administration of China. Type certification procedures: AP-21-AA-2023-11R1[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2023: 41.
- [3] 何歆, 张弓. 民用航空发动机适航要求解读(结构审定)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2019: 41-52.  
HE X, ZHANG G. Interpretation of airworthiness requirements for civil aero-engines (structural certification)[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2019: 41-52.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 航空发动机适航规定: CCAR-33-R2[S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2016: 9.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China: CCAR-33-R2[S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2016: 9.
- [5] Federal Aviation Administration. Aircraft engine type certification handbook: Advisory Circular No.33-2B[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 1993.
- [6] Federal Aviation Administration. Manufacturing process of premium quality titanium alloy rotating engine components: Advisory Circular No. 33.15-1[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 1998.
- [7] Federal Aviation Administration. Manufacturing processes for premium quality nickel alloy for engine rotating parts: Advisory Circular No. 33.15-2[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 2011.
- [8] Federal Aviation Administration. Oxidation, hot corrosion, thermal fatigue, and erosion characteristics testing to support 14 CFR, part 33, §33.15, compliance for turbine engines: Advisory Circular No. 33-11[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 2014.
- [9] European Union Aviation Safety Agency. Decision on certification specifications, including airworthiness codes and acceptable means of compliance for engines: AMC E 70[S]. Cologne: European Union Aviation Safety Agency, 2003: 91-93.
- [10] 中国民用航空局航空器适航审定司. 航空发动机审定 AC-33-AA-2024-01R1[S]. 北京: 中国民用航空局, 2024: 72-79.  
Aircraft Airworthiness Certification Department of CAAC. Aircraft engines airworthiness standards: AC-33-AA-2024-01R1[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2024: 72-79.
- [11] 尹泽勇, 丁水汀, 李果, 等. 航空发动机下一代适航规章制定策略和技术路径[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 230-239.  
YIN Z Y, DING S T, LI G, et al. Formulating strategy and technology path for next generation airworthiness regulations of aero-engines[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 230-239.
- [12] 王大伟, 王伟, 冯振宇. 民用航空发动机限寿件适航符合性方法[J]. 科技导报, 2013, 31(13):49-53.  
WANG D W, WANG W, FENG Z Y. Airworthiness compliance of life-limited part of civil aircraft engine[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(13): 49-53.
- [13] 孙诗誉, 栗晓飞. 增材制造零件适航审定路径分析及启示[J]. 航空科学技术, 2021, 32(10):42-48.  
SUN S Y, LI X F. Analysis and inspiration of airworthiness certification path for additive manufacturing parts[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(10): 42-48.
- [14] 金海鹏, 叶雷, 刘世英, 等. 民机材料适航符合性验证方法和技术发展[J]. 航空材料学报, 2022, 42(3): 1-11.  
JIN H P, YE L, LIU S Y, et al. Research progress of airworthiness conformity verification method and technology of civil aircraft materials[J]. Journal of Aeronautical material, 2022, 42(3): 1-11.

- [15] 张弓, 何歆. 涡轴 16 发动机结构审定[M]. 北京: 航空工业出版社, 2021.  
ZHANG G, HE X. WZ16 engine structural certification[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2021.
- [16] 郭家琛, 甄博, 冯建文, 等. AEC2.0L 活塞发动机适航审定实践: 结构强度[M]. 北京: 中国民航出版社, 2025.  
GUO J C, ZHEN B, FENG J W, et al. AEC2.0L reciprocating engine certification practice: structural certification [M]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 2025.
- [17] 王永明. 用好适航审定政策 提升型号审查效能—从 AG600 型飞机适航审查视角看审定政策在型号审查中的作用[J]. 航空维修与工程, 2025(8):13-15.  
WANG Y M. Utilizing airworthiness policies to enhance the efficiency of certification - the role of policies in type certification from the perspective of AG600 aircraft type certification [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2025(8):13-15.
- [18] 中国民用航空适航审定中心. 民用航空产品新材料适航审定技术说明: CTN-MULT-002-R0[S]. 北京: 中国民用航空适航审定中心, 2021.  
Airworthiness Certification Center, CAAC. Certification technical note for new material certification: CTN-MULT-002-R0[S]. Beijing: Airworthiness Certification Center, CAAC, 2021.
- [19] 中国民用航空适航审定中心. 民用航空产品新工艺适航审定技术说明: CTN-MULT-003-R0[S]. 北京: 中国民用航空适航审定中心, 2021.  
Airworthiness Certification Center, CAAC. Certification technical note for new process certification: CTN-MULT-003-R0[S]. Beijing: Airworthiness Certification Center, CAAC, 2021.
- [20] 中国民用航空适航审定中心. 成附件材料和工艺审定技术说明: CTN-MULT-004-R0[S]. 北京: 中国民用航空适航审定中心, 2021.  
Airworthiness Certification Center, CAAC. Certification technical note for material and process certification of accessories: CTN-MULT-004-R0[S]. Beijing: Airworthiness Certification Center, CAAC, 2021.
- [21] 中国民用航空适航审定中心. 标准件审定技术说明: CTN-MULT-005-R0[S]. 北京: 中国民用航空适航审定中心, 2021.  
Airworthiness Certification Center, CAAC. Certification technical note for standard parts: CTN-MULT-005-R0[S]. Beijing: Airworthiness Certification Center, CAAC, 2021.
- [22] 中国民用航空适航审定中心. 民用航空发动机增材制造相关材料及工艺审定技术说明: CTN-33-033-R0[S]. 北京: 中国民用航空适航审定中心, 2023.  
Airworthiness Certification Center, CAAC. Certification technical note for material and process certification of additive parts: CTN-33-033-R0[S]. Beijing: Airworthiness Certification Center, CAAC, 2023.
- [23] 中国民用航空适航审定中心. 关于复合材料风扇叶片使用退化、制造分散度、最小材料属性以及环境影响审查的技术说明: CTN-33-005-R0[S]. 北京: 中国民用航空适航审定中心, 2021.  
Airworthiness Certification Center, CAAC. Certification technical note for degradation, manufacturing dispersion, minimum material properties, and environmental impact of composite fan blades: CTN-33-005-R0[S]. Beijing: Airworthiness Certification Center, CAAC, 2021.

---

收稿日期: 2025-08-20; 录用日期: 2025-09-01

通讯作者: 何歆(1989—), 男, 高级工程师, 研究方向为适航, 联系地址: 北京市朝阳区花家地东路 3 号(100102), E-mail: [hexin\\_acc@caac.gov.cn](mailto:hexin_acc@caac.gov.cn)

(本文责编: 高 磊)