

# 中国航发商发无损检测团队

## —— 2023 年度工作进展 ——

2023 年，中国航发商发理化计量部无损检测团队十九位成员（见图 1）秉承“大道至简，实干为要”的原则，以保障发动机型号研制为第一要务，紧密服务一线检测需求，全年完成七万余件次检测任务。“问题导向，创新驱动”，面对发动机检测难题，无损检测团队深度思考总结，形成多份专利、论文、集团标准等。



图 1 无损检测团队成员

### 1 中国航发商发无损检测业务管理模式

无损检测覆盖于航空发动机的设计、生产制造、装配分解以及试验等全过程，基于“小核心、大协作”模式，商用航空发动机生产制造过程主要由供应商完成，根据发动机不同阶段的无损检测需求，商发材料工程部材料检测与评价团队负责供应商的管控和无损检测特种工艺审批以及管理商发公司无损检测标准；商发理化计量部无损检测团队主要负责建立发动机无损检测能力并实施发动机装配、试验、分解等过程中的无损检测，维护公司无损检测能力体系。设计作为发动机研制龙头，全面参与发动机研制过程，因此两个团队基于承接的任务在各个阶段分别与设计沟通对

接。在涉及发动机型号研制过程中无损检测难题时，团队间相互协作，攻坚克难，共同服务于民用航空发动机研制事业。商发无损检测业务管理模式示意如图 2 所示。

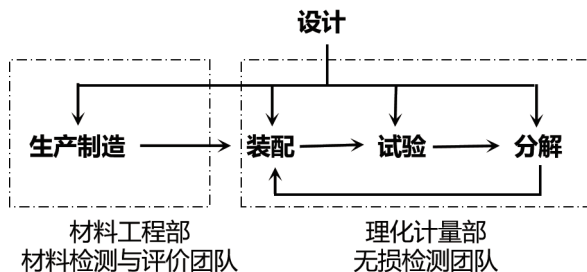


图 2 商发无损检测业务管理模式示意

### 2 无损检测体系建设

#### 2.1 无损检测审核

2023 年理化计量无损实验室无 NADCAP 体系、CNAS 体系评审，为持续提高无损检测体系管理水平，基于公司统一安排及团队内部规划，仍开展了多次外部及内部审核，包括集团专家质量专项审核、符合 CNAS 和 NADCAP 要求的实验室体系内审、公司定期开展的质量审核及团队内部审核。通过各类改进，无损检测团队已建立一套符合 ISO 9001 以及 ISO/IEC 17025 要求的质量控制体系，以 AC7114 系列标准为参考，严格把控各无损检测方法检测过程中的质量控制，形成一套完备的标准、程序文件、指导书、工艺卡体系文件，通过内外审结合，精益改进，持续提高无损检测体系的管控能力。

#### 2.2 无损检测 AEOS 体系建设应用

荧光渗透检测是航空发动机装配、试车、试

验等过程的主要检测方法，占无损检测年任务量的 **80%** 以上，其检测效率直接影响无损检测总体效率。渗透检测的零件种类多样、检测灵敏度要求高，随着检测需求数量持续增加，在设备、人员固定的条件下，亟需解决保证检测质量高度可靠且提高检测效率的难题。无损检测团队以 **AEOS** 生产制造体系中多种工具为手段，从产品分类分族、渗透检测工序流程、价值流图等现状中开展原因分析，形成多维因果图，开展工序标准化、工装优化、现场区域定制化等，实现检测效率提升近 **100%**。产品荧光渗透检测价值流图如图 3 所示。

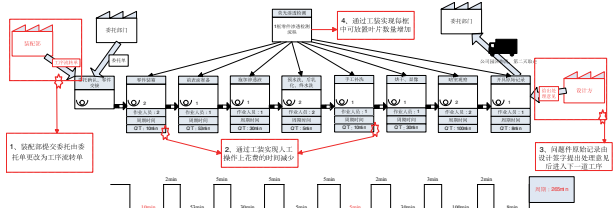


图 3 产品荧光渗透检测价值流图

### 3 NANDTB-CN 上海培训中心

#### 3.1 开展 NAS410/EN4179 标准无损检测人员资格鉴定培训

中国航发商发于 **2023 年 10 月 11 日至 10 月 23 日** 在临港基地开展了 **NAS410/EN4179** 标准无损检测人员资格鉴定培训，设置了五大常规无损检测方法和 **CT** 检测方法培训，且涵盖金属接触法、金属水浸、复合材料接触法和复合材料水浸等多种超声检测技术，近 **150 位** 从事航空航天工作的学员报名参加此次培训（见图 4）。上海培训中心特邀行业资深教师为学员们开展了详尽的理论基础知识讲解，并提供了充分的实操练习，在资质培训中融入大量的航空航天零部件无损检测经验分享，使学员通过充分答疑解惑来提升专业能力。



图 4 2023 年上海培训中心培训班合影

#### 3.2 开展主制造商无损检测标准培训

此次参加 **NAS410/EN4179** 标准无损检测人员资格鉴定培训学员，大部分来自于商飞和商发的供应商单位，为提高供应商学员对商用飞机和航空发动机零部件无损检测工艺控制过程的理解和认识，培训中心于 **2023 年 10 月 24 日和 10 月 25 日** 为商飞和商发供应商学员开展了主制造商无损检测标准培训（见图 5）。

标准培训内容主要包括产品无损检测管控环节及流程，从特种工艺资质、人员要求、设计输入到检测准备、主制造商工艺批准、检测实施等，实现检测过程的高可靠性控制、检测结果的有效追溯。授课教师详细介绍了每一个环节的流程实现过程，同时讲解了特殊零部件的附加管控要求，例如转动件、关键锻件、铸件等。

通过开展此次主制造商标准培训，以一对多的形式提高了主制造商对供应商的培训效率，提高了供应商对客户无损检测标准的理解，使得飞机和航空发动机从设计到制造过程各环节检测紧密连接，共同保障国家大飞机和航空发动机零部件无损检测的一致性和可靠性。



图 5 2023 年主制造商无损检测标准培训现场

### 4 专项技术研究

#### 4.1 主编集团标准《小直径管棒材超声检测用水浸线聚焦探头要求和测试方法》

航空发动机叶片、燃油管路、滑油管路为小直径管棒材加工制作而成，这些小直径管棒材在粗加工阶段根据标准要求需采用水浸超声检测方法检测材料内部缺陷情况。当前所采用的通用标准仅有选用探头原则，未明确探头具体性能参数及要求，导致使用的探头性能差异较大，从而影响超声检测结果的一致性。通过编制小直径管棒材水浸超声检测探头相关标准，基于目前探头制

造水平对探头性能提出要求，并根据探头的性能差异进行分组，以便在超声检测时可相互补充。同时，参考国内外超声探头性能测试及表征相关标准，结合小直径管棒材水浸超声检测要求以及探头制造水平，提出不同探头适宜的性能表征、测试方法及参数限值，以便检测人员合理选用探头，从而保证超声检测工艺的规范性及检测结果的一致性。

#### 4.2 航空发动机叶片荧光检测缺陷自动标记测量系统

航空发动机叶片作为发动机的关键零件，其性能直接影响了航空发动机的可靠性和安全性。自公司具备荧光渗透检测能力以来，叶片的渗透检测任务成倍增长，为便于记录、传递、跟踪处理检测缺陷零件，需要对叶片缺陷荧光显示进行拍照记录。因荧光渗透检测缺陷观察需要在黑光灯下进行，拍照时存在亮度低、零件反射紫外线强度过高、曝光时间长、焦距难以捕捉等原因，导致缺陷边界模糊、高亮背景显示、无法识别出缺陷在零件上的位置。同时，拍照时需要多人协作，效率低，成本高，影响检测周期。通过搭建荧光缺陷图像快速采集系统，结合软件处理实现图像自动标记测量功能，实现了荧光缺陷检测图像智能分析和存储传递功能，该系统目前已在荧光渗透检测试片中得到初步应用，将进一步对系统进行优化，深入探索在航空发动机叶片零部件中的应用研究。

#### 4.3 航空发动机复杂结构件 CT 工艺改进

航空发动机高温合金复杂结构件一般具有空间结构交错且尺寸精细的特征。如发动机燃油喷嘴为回转体结构，具有薄壁、狭缝、叶型等特征；发动机涡轮叶片为扁平空腔结构，具有各种流道支板、肋板及斜肋等结构特征。发动机高温合金复杂机构件的内部缺陷通常采用 CT 检测，存在的问题是散射伪影及射束硬化伪影严重，给结构件内部缺陷评定带来极大困扰。为量化复杂结构件 CT 检测灵敏度，开展系列复杂结构件 CT 检测工艺研究，采用制作对比试块的方式，将结构件拆解成多个分体成形，每个分体上分别预制不同规格尺寸的人工孔，标定人工孔尺寸后再将多个分体组合成对比试块，通过优化迭代 CT 检测工艺，评价不同 CT 系统对复杂结构件的缺陷检

测灵敏度，建立 CT 检测工艺评价系统。

#### 4.4 航空发动机涡轮叶片 CT 检测六点定位坐标方法研究

大型民用航空发动机具有高性能、长寿命、高可靠性与经济性等要求，对推重比要求日益提高，发动机涡轮前工作温度进一步提升。随着发动机涡轮前燃气温度的大幅提高，涡轮叶片在使用先进耐温材料和热障涂层的基础上，必须使用先进气膜孔冷却技术。气膜孔形状为簸箕形扩张孔或更为复杂的形状，孔直径和加工定位精度均为微米级，定位坐标系为给定六点坐标系。经过技术论证，目前比较合适的气膜孔尺寸及位置度测量方法为工业 CT 尺寸测量。目前 CT 常用软件坐标系有两种：一种为基于零件结构特征点、线、面，利用 321 原则建立坐标系；另一种为基于零件与 CAD 设计图全型面匹配公差最小的原则建立坐标系。这两种坐标系与给定六点坐标系存在一定的误差，且根据零件加工精度不同，误差波动不能评估，导致涡轮叶片气膜孔位置度的测量精度无法评估。本研究设计了专用数据处理模块，通过导入 CT 三维数据并进行多轮优化迭代收敛算法和坐标系移动，在三维数据上搜索到满足设计要求的六个给定点，建立给定六点的坐标系，最终实现叶片三维数据与设计模型的高精度匹配，解决了气膜孔位置度的精确测量问题。

### 5 展望

2024 年，中国航发商发无损检测团队将继续保持航空报国志向，脚踏实地服务于发动机研制生产，主动发现问题，勇于解决难题，积极与无损检测同仁互相交流，共同奋力跑出航空发动机无损检测技术的加速度。

中国航发商用航空发动机有限责任公司

理化计量部

靖珍珠，李泽 供稿

2024 年 1 月