

# 无损检测助推民用航空动力

——记中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司无损检测年度进展

2020 年对于中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司（简称中国航发商发制造）无损检测团队是非凡而又难忘的一年，面对疫情的严峻考验，团队努力战胜各种风险挑战，脚踏实地，不断完善自身能力，高质量高效率地推进航空发动机自主研发建设。

无损检测团队由 13 位成员组成，其中包括 1 位研究员级高级工程师，2 位高级工程师。



无损检测团队成员

## 1 商用大涵道比涡扇航空发动机无损检测的特点

商用大涵道比涡扇发动机的性能、质量、耐飞性、可靠性和安全性要求均较高，其制造中使用了大量的复合材料及单晶材料等新材料，采用了最新的工艺和最新的结构设计，这使得航空发动机无损检测具有不同于其他行业无损检测的一系列特点。

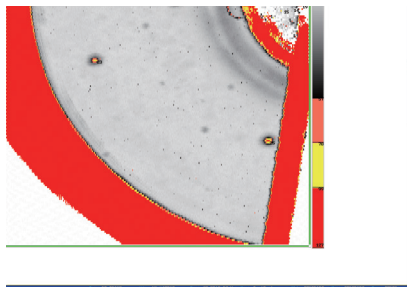
### 1.1 检测的全面性

无损检测贯穿于航空发动机的整个服役期间，覆盖设计、研制、生产、使用的全过程。首先，在设计时就需要考虑设计结构的无损检测可达性、选用材料的可检性以及可维护性；在生产制造过程中，其关键件、重要件、一般件等，均需进行无损检测，需要综合考虑无损检测的可实施性和无损检测技术选用的充分性和合理性。

### 1.2 灵敏度要求

航空发动机质量要求很高，对无损检测灵敏度的要求也较高，对关键件检测灵敏度的要求更高。因此，需要采用检测噪声控制技术、缺陷噪声识别技术进行降噪，因而无损检测的难度大。例如，在厚度为 150 mm 的发动机

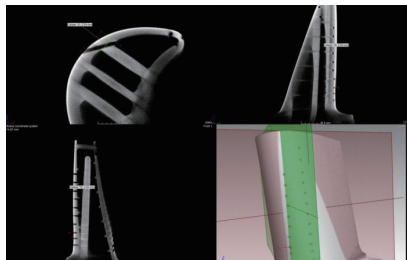
粉末涡轮盘全深度范围内，要求可检测出  $\phi 0.4 \text{ mm} - 18 \text{ dB}$  平底孔当量的缺陷。



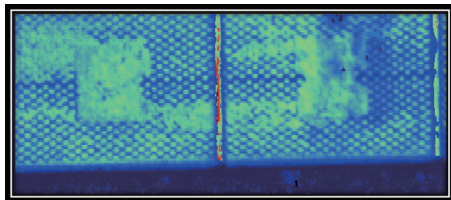
粉末盘 C 扫描结果

### 1.3 检测方法多样性

同一检测对象，需要综合运用多种无损检测方法进行检测，并且涉及到的无损检测技术较多。例如单晶空心涡轮叶片需要采用渗透检测技术检测表面缺陷，采用射线检测技术检测内部缺陷，采用超声检测和 / 或电子计算机断层扫描（CT）成像检测技术测量壁厚、评估激光打孔质量、测量位置度等。蜂窝封严结构需要采用超声或渗透检测技术检测蜂窝焊接质量。



叶片 CT 成像结果



蜂窝封严环高频超声 C 扫描结果

### 1.4 无损检测体系

无损检测质量控制严谨，检测方法标准及质量管理标准配套。NADCAP（国家航空航天和国防合同方授信项目）

认证已逐步成为国际航空航天工业特种工艺的准入门槛，商发制造无损检测体系于 2019 年首次通过 NADCAP 认证，并持续对标先进，以保障航空发动机在制造、科研、装配、试车等过程的检测精细化、国际化的卓越管控。

### 1.5 无损检测新方法与新技术

持续开展无损检测新方法、新技术的研究与应用以满足持续适航的需求。面对商用航空发动机适航所需的各类试验过程中的无损检测、新材料与新工艺产品适航审核中的无损检测以及无损检测自审的适航等需求，需不断开展方法技术研究，提高检测的可靠性及检测效率，确保产品的使用安全，以通过适航审核。

## 2 无损检测能力建设

### 2.1 无损检测条件建设

2020 年，团队新增 6 台无损检测设备，分别为盘环件水浸超声波检测系统、棒阳极射线检测机、磁粉探伤机、涡流测厚仪和两台便携式超声检测设备。此外，工业 CT 系统、静电喷涂渗透检测线、水浸超声扫描设备等将于 2021 年完成到货安装。

### 2.2 无损检测体系建设

#### 2.2.1 持续对标 NADCAP 要求

2020 年 3 月是国际质量评审协会（PRI）对商发制造无损检测的审核计划时间，虽然面临全球疫情带来的不确定性影响，但无损检测团队依然克服了重重困难按期完成了自审和相应整改，同时密切关注审核网站相关通知以做出快速反应和调整。

2020 年 3 月 30 日至 4 月 3 日，PRI 对理化计量中心开展 NADCAP 无损检测复审和扩项评审工作。在 2019 年获得认证的渗透检测、超声检测和磁粉检测等 3 个专业的的基础上，审核范围增加了射线检测扩项评审。2020 年 5 月 7 日，中心实验室获得 NADCAP 无损检测资质证书，标志着商发制造无损检测工艺控制一直处于国际航空工业主流水平及高质量技术管控状态，可为航空发动机制造、科研、装配过程中的产品质量提供有效保障。



NADCAP 资质证书

#### 2.2.2 顺利通过 CNAS 审核

2020 年 9 月，中国航发商发制造理化计量中心实验室迎来了中国合格评定国家认可委员会（CNAS）审核组的审核（此次审核，申报了五大常规无损检测法），无损检测体系控制、程序文件和现场操作均顺利通过了 CNAS 审核评审，标志着实验室持续具备承担航空发动机零部件的无损检测服务资质。

## 3 建设 NANDTB-CN 无损检测培训中心

### 3.1 无损检测 2020 年培训班稳步运行

2020 年 9 月 5 日至 9 月 20 日，中国航发商发制造作为中国航空航天无损检测认证部（NANDTB-CN）的上海培训中心，顺利完成 116 位航空航天无损检测从业人员的 NAS410/EN4179 资格鉴定培训工作。

此次参训的 116 位学员主要来自中国航发、航空工业、商飞等 65 家飞机和航空发动机主制造商及供应商企业，较 2019 年学员人数增长 1/3。此次培训在内容上新增了复合材料的接触法超声和水浸超声检测，较 2019 年超声检测培训有了新的突破。培训班的顺利开展，标志着 NANDTB-CN 上海培训中心已获得行业的广泛认可和高度评价。

### 3.2 召开 2020 航空航天无损检测 NADCAP 审核项目技术交流会

2020 年 9 月 18 日，NANDTB-CN 联合中国航发商发制造组织召开了 2020 航空航天无损检测 NADCAP 审核项目技术交流会。

会议以航空航天主制造商与供应商的共同聚焦点 NADCAP 审核为主题，以 PRI 亚太区经理和资深审核员、飞机和航空发动机主制造商无损检测代表、多次通过 NADCAP 审核的航空单位无损检测专家作为各个专题的主讲人，为无损检测行业同仁分享了 NADCAP 审核过程、各主制造商对供应商无损检测的管控要求、对无损检测各专业 NADCAP 审核项目的理解、审核不符合项的整改经验等内容。此次交流会，促进了航空发动机主制造商的无损检测要求与供应商的无损检测过程控制之间的衔接一致，推动了航空航天无损检测的繁荣发展。

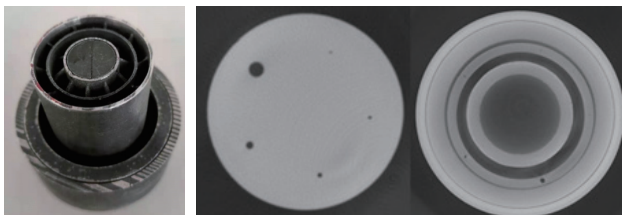


交流会合影

## 4 科学研究

### 4.1 商用航空发动机 3D 打印零部件的 CT 检测技术

随着航空发动机研制周期的不断缩短，制造难度不断提高，其对复杂精密构件的制造也提出了越来越高的要求，不仅要求有高性能复杂精密构件快速高效的制造能力，而且要求有大型复杂结构件的直接制造能力，而传统的制造技术难以满足上述要求。中国航发商发制造目前已经开展了高温合金材料的燃油喷嘴激光选区熔化成型制造工艺的研究，同时要求配套开发相应的无损检测技术。



(a) 试样外观 (b) 检测结果

复杂结构件增材制造试样外观及 CT 检测结果

燃油喷嘴内部结构复杂，常规的射线检测方法容易造成影像的相互叠加和干扰。2020 年团队通过燃油喷嘴 CT 检测关键技术攻关，初步了解了 3D 打印零部件缺陷的产生机理及 CT 检测技术的优势及局限性，制作了 3D 打印对比试块，初步探索了 3D 打印件的 CT 缺陷检测灵敏度与零件尺寸、结构的内部联系，为进一步优化迭代 3D 打印件 CT 检测技术及检测灵敏度积累了原始数据，为商发制造燃油喷嘴增材制造工艺提供了检测保障。

### 4.2 航空发动机复合材料风扇叶片的超声检测技术

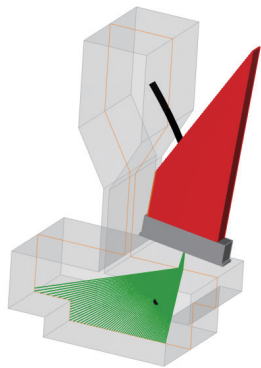
现代涡扇航空发动机正朝着大涵道比、大推力、低油耗、低噪声、高安全性、高可靠性等方向发展，为此，世界各民用航空发动机主制造商都在大力推广复合材料在大涵道比涡扇发动机中的应用，原因在于复合材料具有金属无法比拟的低密度、高比强度和高比刚度，其中树脂基复合材料由于重量轻、技术成熟度高被最大程度地应用于航空领域。树脂基复合材料风扇叶片已在国外先进民用涡扇发动机上得到了重要应用，同时也是商用航空发动机的主要研究技术之一。

在航空发动机整个生命周期中，复合材料风扇叶片结构的复杂性和应用的特殊性对无损检测提出了较高要求，不仅需要形成大型自动仿形的穿透水浸超声扫描能力，同时还要拓展适用于原位检测的便携式超声检测能力，以满足复合材料风扇叶片不同状态下的检测需求。

### 4.3 航空发动机工艺仿真技术

仿真技术是支撑航空发动机自主研发的重要手段，可大幅提高航空发动机的研发效率和质量，减少实物试验反复次数，缩短研制周期，降低研制成本。随着航空发动机性能的不不断提升，发动机零部件的复杂程度、检测难度也越来越高，并对无损检测技术提出了更高的要求。

对航空发动机零部件无损检测而言，仿真技术的应用，不仅能深化对复杂零部件无损检测结果和规律的认识，在工艺试验前利用仿真技术制定适宜的检测工艺，还能大大节省工艺试验时间和经费。其也可用于评估检测工艺的合理性，优化检测工艺，为设计及制造工艺的优化提供支撑。对批量检测零件、复杂结构零件或大型零件（如机匣）等需要设计检测辅助试块、探头、工装零件，还可利用工艺仿真结果提出适宜的试块、探头、工装夹具制造方案。因此，航空发动机零部件无损检测通过仿真技术，能大大提升对航空发动机的质量控制效率，同时降低检测成本，有助于推动航空发动机无损检测工艺设计的模式变革。



CIVA 超声仿真信号模拟示意

## 5 展望

面对即将到来的 2021 年，中国航发商发制造无损检测团队将在团队发展、实验室条件建设、培训中心运行和科研专项等方面继续努力奋斗，同时持续建设行业无损检测技术交流平台，进一步推进航空航天无损检测技术管理发展，集行业无损检测同仁之力助推国产航空发动机的自主研制工作。

中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司

李泽，靖珍珠 供稿

2021 年 2 月