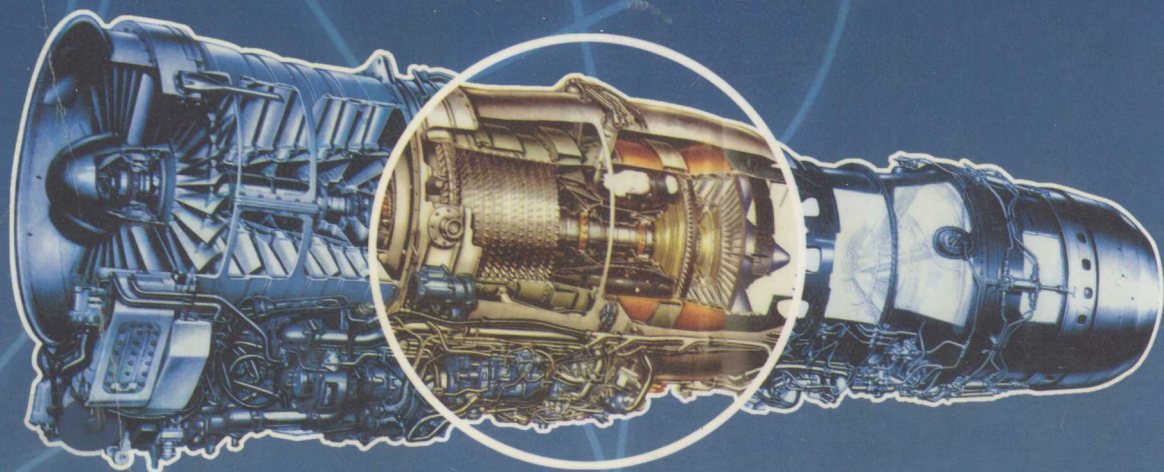


航空发动机叶片故障及预防 研讨会论文集

中国人民解放军空军装备部科研订货部
中国航空工业第一集团公司发动机事业部
中国航空工业第二集团公司质量监督部



航空工业出版社

V23-53
1012



2008022660

V23-53
1012-1

航空发动机叶片故障及 预防研讨会论文集

中国人民解放军空军装备部科研订货部
中国航空工业第一集团公司发动机事业部
中国航空工业第二集团公司质量监督部



航空工业出版社

2008022660

内 容 提 要

本论文集收集航空发动机设计所、主机厂、叶片专业化厂、材料研究院、高等院校在航空发动机叶片故障及预防研讨会上发表的论文。内容十分丰富,系统地总结了近20年来发动机叶片失效分析工作,在总结经验教训的基础上,提出了叶片制造技术的发展方向、质量控制和安全措施,以及可靠性工程亟待解决的课题。本书不仅为从事航空发动机的设计人员、制造人员、管理人员提供借鉴和帮助,而且也将为其他行业的设计、研制科技人员与院校师生提供参考。

航空发动机叶片故障及预防研讨会论文集
Hangkong Fadongji Yepian Guzhangjiyufang
Yantaohui Lunwenji

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话: 010-84926529 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

内部发行

2005年1月第1版

2005年1月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 11.75

字数: 292千字

印数: 1—1000

定价: 50.00元

序

航空发动机是飞机的“心脏”，对飞机的飞行速度、机动性、有效载重、航程、可靠性、经济性、维修性和环境适应能力均起着决定性的作用。而压气机和涡轮又是航空发动机的两个最关键的部件，对发动机的推重比、寿命、可靠性、安全性、维修性等均具有直接的影响。压气机和涡轮叶片工作环境十分恶劣，承受着气动应力、振动应力、离心应力、热应力、高温氧化和热腐蚀的综合作用，是航空装备的易损件之一。据不完全统计，发动机故障中有70%~80%是由叶片故障引起的。

航空发动机叶片的设计与制造是多学科交叉、多部门参与、技术密集、综合性极强的系统工程，涉及到空气动力学、机械振动学、结构强度学、材料科学与工程、机械制造工艺学与工程、特种工艺学与工程、表面防护科学与工程、疲劳设计、高效冷却结构设计、微孔加工工艺与设备、试验技术与设备、检测技术与仪器等。因此，航空发动机叶片的设计与制造技术是当今难度最大的高科技综合技术，是航空工业的核心技术。航空发动机叶片是使用条件最苛刻，技术要求最严格的零件之一，在研制、生产和使用过程中，存在各种各样的复杂问题和许多尚未被人们所认识的影响因素，因此，出现不同程度的故障是难免的。认真分析研究叶片出现故障的征候，查明原因，吸取教训，总结经验，采取针对性较强的预防措施和对策，是提高叶片质量，确保发动机可靠性的有效途径。

近年来，国产各型航空发动机在使用中暴露出许多质量问题，其中叶片的质量问题占了相当大的比例，直接危及飞行安全，影响战备任务的完成。这种情况已引起空军装备部科研订货部、中国航空工业第一集团公司发动机事业部和中国航空工业第二集团公司质量监督部的高度重视，组织有关院所、高校和工厂开展了大量的失效分析工作，并召开了“航空发动机叶片故障与预防研讨会”，会上总结交流

了多年来叶片失效分析工作中的经验、教训和预防措施,同时也深入分析了导致叶片重复出现故障的比较突出的深层次原因,认真研讨了加强航空发动机叶片技术质量工作以及预防叶片失效的措施。

本论文集收集了航空发动机设计所、主机厂、叶片专业化厂、材料研究院、空军研究所、高等院校等单位在研讨会上发表的论文18篇。这些论文和报告内容十分丰富,信息量大,系统地总结了近二十年我国航空发动机叶片的失效分析工作,在总结经验教训的基础上,提出叶片设计、制造技术的发展方向,质量控制的措施,以及安全、维护、使用和可靠性工程亟待解决的科研课题;同时也对航空发动机叶片失效分析的共性问题、失效模式、失效分析程序、断口定量分析和反推技术作了比较深入的探讨。本论文集不仅为从事航空发动机设计人员、制造人员、维护修理人员、技术管理人员提供借鉴和帮助,而且也将为其他行业设计、研究的科技人员与高等院校师生提供一本工程实践性强的参考书。本论文集的出版发行,将对我国航空发动机叶片失效分析与预防基础研究工作起到进一步的推动作用,促进航空发动机叶片设计、制造技术的提升,促进叶片制造质量的提高,确保叶片及发动机安全可靠地工作,还飞机一颗健康的“心”。

中国工程院院士
中国一航科技委副主任

刘大响

2005年1月18日

前 言

航空发动机叶片是航空发动机最关键的零件之一，其工作环境恶劣，设计、试验技术复杂，加工、检测技术要求高，是知识密集、技术密集产品。近年来，国产各型航空发动机在使用中暴露的质量问题十分突出，其中叶片的质量问题占了相当大的比例。叶片故障危害性大，直接危及飞行安全，影响战备任务完成。对此，空军和航空工业部门高度重视，组织有关院所、工厂开展了大量工作，使叶片质量问题突出的形势得到一定缓解，但当前航空发动机的质量形势仍然比较严峻。

为进一步加强航空发动机叶片的技术质量工作，扭转航空发动机叶片质量问题突出的被动局面，2003年9月，空军装备部订货部、中航一集团发动机部和中航二集团质量监督部联合组织召开了“航空发动机叶片故障及预防研讨会”，总结交流了近年来在研究解决各类叶片故障工作中的经验和办法，深入分析了导致叶片质量问题突出的深层次原因，认真研讨了加强航空发动机叶片技术质量工作，采取有效的叶片故障预防措施。

本论文集收集了“航空发动机叶片故障及预防研讨会”交流研讨的论文、报告共18篇。编审中仅对部分文字、术语进行了修订，对论文的论据、结论等均原样保留，未加修改。

本论文集汇编的论文及报告，内容丰富、信息量大，是航空发动机设计、制造单位及有关院校、研究所多年来开展航空发动机叶片失效分析和设计，工艺、质量改进工作的实践经验总结，是航空发动机行业的宝贵财富，具有很好的指导作用和借鉴参考价值，供机关、研究所、工厂有关人员参考。

目 录

航空发动机叶片技术质量情况调研分析	空装订货部叶片技术质量调研组 (1)
黎明航空发动机公司批生产在役发动机叶片故障及改进措施	黎明航空发动机公司, 驻黎明航空发动机公司军代表室 (8)
WP13 系列发动机叶片故障问题及解决办法	黎阳航空发动机公司, 驻黎阳航空发动机公司军代表室 (25)
航空发动机叶片故障分析研究	430 厂, 驻 430 厂军代表室 (36)
叶片振动疲劳断裂故障的预防和分析方法	606 所 (54)
航空发动机叶片失效分析及预防措施研究	170 厂, 驻 170 厂军代表室 (74)
航空发动机叶片失效及预防研究	南方航空动力机械公司, 驻南方航空动力机械公司军代表室 (96)
WP6 发动机叶片故障原因分析及改进措施	420 厂, 驻 420 厂军代表室 (104)
WJ5 甲 - I 型发动机叶片故障与技术质量改进措施	120 厂, 驻 120 厂军代表室 (114)
WZ6 系列发动机叶片失效及预防分析	370 厂, 驻 370 厂军代表室 (124)
航空发动机叶片故障及预防的实践与探讨	608 所 (126)
最大限度地降低航空发动机叶片高循环疲劳失效	李其汉 王延荣 王建军 (134)

航空发动机叶片失效分析中的共性问题	李 伟 (140)
国产涡喷发动机叶片断裂排故实践	赵福星 李 伟 (144)
航空发动机叶片的断裂模式及其预防	习年生 陶春虎 (149)
定向凝固和单晶叶片的损伤与预防	陶春虎 颜鸣皋 张卫方 孙传棋 (157)
断口反推疲劳应力在叶片断裂中的应用	张卫方 习年生 陶春虎 高 威 刘高远 (167)
涡轮叶片高温疲劳、疲劳/蠕变试验研究	闫晓军 聂景旭 侯贵仓 赵长占 张学仁 李海燕 (173)

航空发动机叶片技术质量情况调研分析

空装订货部叶片技术质量调研组

1 航空发动机叶片研制生产总体概况

作为航空发动机的技术关键之一,我国航空发动机叶片设计、制造技术是随着我国航空发动机的发展而发展的。我国航空发动机研制生产和修理已走过了 50 多年的历程,经历了发动机修理、备件制造、购买专利仿制、测绘仿制、改进改型和自行研制的道路,发展了涡喷、涡扇、涡轴及涡桨等 40 多种型号航空发动机,其中 22 个机种投入了批量生产,交付部队使用 5.4 万台,出口援外数千台,修理数万台,为我国航空武器装备的发展建设作出了突出的贡献。目前,在航空工业系统承担航空发动机叶片研制生产任务的主要有 7 个航空发动机制造厂、4 个航空发动机设计研究所、1 个航空材料研究院、1 个航空工艺研究所和 1 个航空发动机专业化叶片厂,具备了较强的航空发动机叶片设计、制造能力。每年生产合格装机叶片 300 多万片。另外,一些院校还设立了与航空发动机叶片设计制造有关的学科专业,培养了大批人才。

近年来,为实现新时期军事战略方针,做好对台军事斗争准备,航空装备已经进入了一个跨越式发展时期,有力地促进了航空发动机叶片设计、制造、检测等方面技术的提升与进步。其一是设计试验技术水平得到提高。通过型号研制项目的开展,在叶片气动设计、结构设计、强度校核、热强度分析等方面的计算分析技术得到了明显提高。通过加强技改投入,逐步具备了航空发动机叶片热疲劳、热冲击、气动试验、强度试验、疲劳试验等方面试验的能力,已基本具备了自行设计研制航空发动机叶片的能力。有的企业不等不靠,自筹资金,开展了大量设计、试验等工作,促进了改进改型等研制任务的完成。其二是制造技术水平得到了提高。企业通过技改投入,有重点地引进了一批先进的设备和加工技术,建立起了精铸、精锻、滚轧制坯生产线,拥有了自动化程度较高的模壳、型芯生产线,已具备了等轴晶、定向凝固无余量复杂型腔涡轮工作叶片、导向器叶片铸造,钛合金小余量叶片锻造等能力。其三是叶片生产制造质量保证能力得到加强。引进了一批先进的叶片生产过程检测设备,提高了检测技术。进行了质量体系认证及换版升级工作,质量管理体系得到进一步完善和健全。开展了 6S 管理,规范了现场生产秩序,有效地促进了叶片设计生产质量。其四是加强了叶片技术质量问题的研究和查处。针对近年来各型航空发动机叶片暴露的技术质量问题,有关单位在机关的组织下进行了大量的设计复查、质量复查、计算、试验等故障研究工作,并采取了改进措施,已使不少叶片故障得到了有效解决。

但是,通过调研发现,目前在航空发动机研制生产过程中,还存在许多不尽如人意之处。航空发动机叶片的设计水平与发达国家相比还很落后,叶片设计试验能力较差,叶片精密制坯、锻造、铸造设备与工艺技术落后,工序能力不足,加工制造技术、叶片检测技术与

设备等整体水平都不高,特别是质量管理和过程控制还较为粗放,薄弱环节多,管理和控制不到位的现象时有发生。因此,航空发动机叶片技术质量问题多,外场故障突出,常常造成航空发动机在生产使用中十分严峻的质量安全形势。

据统计,空军在役机种历年发生的发动机故障中,80%为叶片断裂故障,并曾多次导致等级飞行事故和事故征候,情况十分突出。历史上,我国几乎所有型号发动机的压气机工作叶片、涡轮工作叶片和涡轮导向器叶片,均发生过故障。近5年来,在役航空发动机叶片发生过各类较大故障近30种(详见附件),导致了多起飞行事故及事故征候发生,并造成数百台发动机停用、提前返厂排故。虽经攻关改进,不少故障已得到有效的处理,但是,目前仍有WP13系列、WP8、WJ6等发动机的多个叶片故障还处于原因分析或改进措施研究过程之中。

从航空发动机暴露的叶片故障情况看,具有以下几个特点:一是故障模式多样。航空发动机叶片最常见的失效模式为裂纹和折断,也有局部掉块、局部烧蚀、叶尖叶冠磨损、变形伸长、减振凸肩脱开等问题;故障部位一般在叶身表面、榫头榫齿、冷却孔边、进排气边缘、型面转接 R 处等结构强度薄弱和加工易出现问题的部位,这些部位由于应力集中容易萌生裂纹,产生疲劳断裂失效。二是故障原因复杂。造成航空发动机叶片折断失效的多数原因是振动引起的高周疲劳。另外,榫头榫齿部位由于微动磨损,会形成微动磨蚀疲劳;涡轮叶片由于承受热负荷,会产生蠕变疲劳交互作用,在使用过程中出现非正常工况(如喘振、进气畸变、调节不良、喷嘴故障、操作失误等)会引起超温超转、强烈振动、气流冲刷腐蚀、外来物打伤等,均导致叶片失效;叶片生产过程中冶金缺陷、加工缺陷等也是导致叶片失效的常见因素。三是故障后果严重。航空发动机叶片一旦出现折断故障,重则引起发动机喘振停车,或击穿发动机机匣、油管,致使失火,或损坏操纵系统,致使操纵失灵,造成等级事故;轻则损伤气流通道内部件,造成发动机工作不正常。四是故障处理难度大。航空发动机叶片故障是发动机易发、多发性故障,原因复杂,一旦出现故障,处理解决周期都比较大,容易造成成批发动机停用,外场排故难度大,返厂排故损失高,另外,除发动机进口一级叶片和涡轮最后一级叶片外,受发动机结构条件限制,其他各级叶片的原位检测、故障预防、抢修排故等工作往往在外场难以实施,对部队作战训练任务的遂行影响十分严重。

因此,航空发动机叶片研制生产的技术质量工作还亟待得到加强和提高。

2 航空发动机叶片技术质量工作存在的主要问题和薄弱环节

航空发动机是飞机的心脏,航空发动机叶片是目前普遍使用的涡喷、涡扇、涡轴及涡桨等轴流式航空发动机最关键和最重要的零件之一,同时也是设计制造难度很大的零件,其中难度最大的高压涡轮叶片被称做是“皇冠上的明珠”。航空发动机叶片的设计制造有以下几个方面特点。

(1) 航空发动机叶片工作状况恶劣

航空发动机风扇叶片、压气机转子叶片、涡轮工作叶片、导向器叶片等,是发动机气流通道主要部件,在高转速、高温、高负荷、高应力状况下工作。其受力状况极其复杂,不仅承受离心负荷、弯扭负荷、温度负荷,还受到振动、腐蚀、热冲击、气流冲击、蠕变、疲劳、接触挤压、微动磨蚀、外来物打伤等方面的作用。

(2) 航空发动机叶片设计试验技术复杂

航空发动机叶片工况多变, 结构复杂, 环境恶劣, 使叶片设计的边界条件难以确定, 设计计算难度大, 叶片设计涉及的技术领域和学科知识十分广泛, 如气体动力学、工程热力学、传热学、材料力学、断裂力学、振动力学、转子动力学等。其试验验证项目多, 难度大。据权威人士称, 发动机叶片不仅是设计出来的, 而且主要是试验出来的, 叶片在研制过程中需要进行光弹、振动、疲劳、热冲击、抗外物损伤、台架试车及飞行考核等十几项试验。

(3) 航空发动机叶片制造技术复杂

航空发动机叶片关键特性多, 制造技术关键工序多, 特种工艺多, 制造难度大。压气机叶片设计尺寸精度高, 表面完整性要求高, 表面加工质量直接影响叶片可靠性; 涡轮工作叶片和导向器叶片内部气流冷却型腔结构复杂, 制坯技术要求高, 生产制造合格率低, 质量保证要求高; 涡轮工作叶片的锻、铸造技术, 表面渗涂层技术、叶冠耐磨合金技术、榫齿成形技术等, 均是发动机研制生产的关键技术。

(4) 航空发动机叶片检测技术难度大

航空发动机叶片材质要求高, 冶金质量、机械性能要求高, 加上型面、型腔复杂, 表面、壁厚、残余应力、残芯、水流量、渗层等检测要求多, 涉及表面检测、壁厚测量、残芯检测、无损探伤等检测技术。叶片检测是保证叶片质量的关键环节。

航空发动机叶片的这些技术特点和使用特点, 对发动机叶片的研制生产管理、质量管理提出了很高的要求。从调研掌握的情况看, 当前, 在叶片的技术质量工作方面, 还存在一些问题和薄弱环节。

2.1 叶片研制过程存在的主要问题

(1) 设计基础研究比较薄弱

长期以来, 我国发动机设计研制基本上都是测绘仿制。在航空动力研制上总的经费投入不多, 用于航空发动机叶片的经费更是捉襟见肘。受研制经费的限制, 自行设计的叶片较少。对包括叶片在内的发动机结构部件, 缺少系统的分析研究工作, 叶片计算、试验等系统反设计摸底工作不足。叶片失效分析宏观定性多, 计算、试验少。对各型发动机长期使用环境分析不透, 飞行载荷谱收集、处理、应用工作不够充分。试验投入不足, 试验技术落后, 使叶片动频、动应力等重要测试项目难以开展。

(2) 材料基础比较薄弱

我国航空材料体系庞大, 品种繁多, 但材料数据不尽齐全, 材料研究不尽透彻。在发动机叶片设计研制或叶片技术质量问题处理过程中, 由于对航空发动机叶片所用材料的研究不够充分, 缺少材料蠕变、应力应变等方面的材料曲线和数据, 造成计算时不得不对边界条件采取许多近似的处理, 影响了结果的准确性, 有时甚至使一些必要的计算分析难以开展。

(3) 设计改进考虑不周

在进行一些航空发动机叶片改进设计或故障查处过程中, 没有吃透叶片原始设计状况, 局部考虑故障发生部位多, 系统研究叶片整体、盘片耦合、单级与前后级的配合、材料与材料之间的配合等诸多影响因素不足, 系统分析不够充分。由于受到研制或排故经费的限制, 受到试验技术和设备水平的制约, 应进行的叶片试验受到剪裁与压缩, 叶片的设计验证试

验、动应力测试试验、强度考核试验、故障再现试验等进行的不够充分,致使叶片设计不够周全,故障机理不甚明了,有时在解决了旧的故障后,又暴露出了新的问题。例如,为解决 WP6 发动机涡轮盘榫槽裂纹故障,将涡轮盘的结构由五齿改为三齿,反而使 II 级涡轮叶片叶身断裂故障越来越突出。

(4) 预先研究不足

在航空发动机叶片研制过程中,进行叶片设计计算时,基本上采用的都是通用的商业计算软件,自行开发设计的大型三维气动设计等计算软件较少。由于受到重型号、轻预研思想的影响,对叶片预研等基础研究的投入不足,叶片、叶栅设计及试验积累的数据较少,也没有建立我国系统的航空发动机叶片数据库,使得航空发动机型号研制难度加大,周期加长。

(5) 设计与工艺不协调

在航空发动机叶片研制过程中,叶片(尤其是涡轮叶片)的制造工艺水平达不到设计的要求,或难以弥补设计上的不足。设计人员不了解工艺能力,设计指标过高,使工艺难以保证,这是较为突出的问题。例如, WJ5AI 发动机一级涡轮叶片曾先后发生过 6 次断裂失效,其原因之一是没有考虑设计结构形状在铸造工艺和检测方面的可行性,使该处很容易出现铸造缺陷。

(6) 缺少一支高素质的人才队伍

近年来多数航空企业的经济形势均有不同程度的好转,但是,目前航空发动机行业厂所的技术骨干数量依然较少,人员不稳定、人才外流的现象依然比较严重。总体来说,由于航空发动机行业效益较差,收入待遇较低,工作生活条件相对不好,吸引力较低,工程技术人员队伍面临后继乏人的情况。许多人员缺少研制设计航空发动机叶片工作的实际锻炼,积累的经验较少,因而应对叶片技术质量问题的难度较大。

2.2 叶片生产制造过程存在的主要问题

(1) 航空材料冶金工艺研究落后

目前,我国航空发动机叶片新材料、新工艺、新技术的研究比较落后,未得到充分的重视,经费投入严重不足,远远滞后于发动机型号的研制,严重制约了航空发动机的发展,是发动机型号研制中的细瓶颈。如航空发动机涡轮叶片用高温合金母合金原材料的纯洁度控制水平与国际相比还存在较大的差距,合金冶炼质量还不够稳定,叶片生产的合格率受到严重制约。由于材料基础研究、应用研究落后,造成对材料认识不足,工艺技术不够成熟,将会导致发生重大质量问题,出现较大反复,这方面已有深刻的教训。如对 WP13F 发动机 DZ4 定向凝固合金铸造二级涡轮工作叶片工艺研究不够深入,应用研究基础差,缺乏对其产生再结晶条件、过程及危害的认识,是导致叶片发生断裂故障的重要原因之一。

(2) 叶片制造工艺水平落后

航空发动机叶片生产制造工艺技术复杂,工艺过程繁杂,由于工艺控制不严、工艺规定不细、工艺水平落后等,容易造成叶片技术质量问题的发生。有些单位工艺规程陈旧,设备改造和加工技术进步以后,工艺文件未及时更换。许多叶片生产单位尚不具备毛坯精锻、无余量精铸技术,叶片内部冶金质量与叶片尺寸分散度较大。目前叶片型面加工方法主要是手工抛光,许多单位还不具备蠕动磨削、数控加工、振动光饰、磨粒流抛光等精确型面加工技术,影响了叶片尺寸精度和叶片表面完整性。由于不掌握计算机模拟工艺仿真等高新技术,

工艺规程优化难度大,叶片研制工艺攻关周期较长。发动机研制设计定型后,叶片批量生产未及时从试验室试制转化到生产线批量生产,不能适应多品种多批量的生产要求。

(3) 叶片加工设备老旧

航空发动机叶片加工工艺复杂,加工难度大,要求其加工设备的精度高,专用性强。但是,长期以来,航空发动机系统的技术改造力度不够大,航空发动机叶片设备技改投入也不足,叶片生产线设备陈旧问题十分突出。通过调研发现,多数航空发动机叶片生产线上的锻造、铸造、热处理、焊接等热工艺生产设备陈旧,70%是20世纪六七十年代的设备,制坯设备落后,影响了毛坯质量,有的长期达不到毛料设计要求,叶片毛料合格率低。除个别厂家外,多数航空发动机叶片生产线上的机械加工设备存在老化现象,设备数控化程度比较低,近80%的设备是20世纪六七十年代水平。420厂等单位由于长期缺少型号研制任务,国家技改投入较少,自身经济困难也无力进行设备更新,叶片生产设备老化情况更加突出,一些老旧设备由于长期损耗,设备状况不好,对叶片生产制造效率和加工质量影响较大。近年来,由于新型号发动机的研制,国家加大了技术改造的投入,已引进了一些先进设备,更新了少数陈旧设备,据调研,这些新设备所占比例不到10%,且主要用于新机叶片小批量的研制试制生产,未在陈旧机种叶片的生产中得到应用,设备效率未得到充分的发挥。而投入批量生产后,又面临生产能力严重不足的局面。一些单位,如黎阳公司、170厂等,在批生产发动机叶片出现故障后,为提高加工质量,自筹资金进行了部分设备的技术改造,采用了较先进的数控加工设备,但总体上仍难以满足大批量叶片生产的需要。

2.3 叶片质量控制存在的主要问题

(1) 过程控制不严格

多数航空发动机叶片生产线每年航空发动机各类叶片的生产数量都比较大,但是现场生产管理和质量管理采用的都是比较传统的、粗放的管理模式,许多环节管理不到位,控制不严格,控制节点设置不合理,控制措施针对性不强,叶片生产质量不稳定,质量波动大,废品率高,造成一些质量隐患。如叶片生产过程关键工序的控制,多数单位“三定”控制不严格,作业指导书只照抄工艺规程,有的甚至没有编制作业指导书。对关键工序的控制情况,多数单位都缺少监督检查。一些单位在生产过程中质量控制不严格,可追溯性差,使不合格叶片混入生产线装机使用,造成较大技术质量问题。WP8发动机一级压气机叶片折断、WP6发动机九级压气机叶片折断等故障,目前虽然已经妥善解决,但该故障是以前从未发生过的叶片严重故障。受到设备、工艺水平的影响,涡轮工作叶片及导向器叶片的生产合格率十分低,占据了每个航空发动机制造厂每年质量成本的绝大部分比率,有的工厂持续多年达数百万元。而同样一厂之内,有的单位转包车间在生产外商航空发动机叶片或叶片盘时,却大量采用了单元控制、数理统计、六西格玛等现代先进的生产、质量管理技术,叶片合格率水平较高。

(2) 检测手段落后

目前多数在役航空发动机叶片生产线采用模板检测、目视等传统方法检测叶片型面等质量,多数渗透检验、X射线照相检验、磁粉检验、超声检验等无损检测的设备老化、陈旧。现场检测使用的工夹量具等,80%已使用了30年以上;用于进行叶片材料冲击韧度、抗拉强度以及硬度等力学性能检测设备,进行化学成分分析等理化检测的设备陈旧情况也比较严

重,有的不得不采用外委检测的方法。一些物化检测设备技术较为落后,只能作出半定量半定性的结果,难以满足生产的需求。生产工厂缺少比较先进的三坐标检测、光谱分析仪、透射电镜、扫描电镜、电子探针、能谱仪、金相分析仪等设备,检测质量容易受到人为因素的影响。

(3) 外场维修性、保障性的研究不够

目前外场多数在役航空发动机是经过测量仿制发展而来的,在当初设计时对使用维修性、保障性等方面的考虑不够周全,使用中难以开展对发动机气流通道中各级压气机、涡轮叶片的原位探伤、原位修理,对检测周期、损伤容限等方面缺少系统的研究。如黎阳公司、420厂虽然与空一所等单位合作研制出了涡轮工作叶片、压气机叶片外场超声探伤仪器,在解决WP13和WP6发动机一级压气机转子叶片、二级涡轮工作叶片故障中起到了很大作用,但是对其他各级叶片的检查办法,还是不多。

3 对加强航空发动机叶片技术质量工作的建议

航空发动机叶片的质量对保证航空发动机安全可靠使用有着十分关键的作用。为扭转目前叶片故障突出,造成航空发动机技术质量形势严峻的被动局面,必须研究采取有效措施,加强叶片设计、生产过程技术质量管理,强化生产工艺管理和过程质量控制,对叶片技术质量问题进一步开展深层次的分析和系统的研究,从而促进叶片质量的提高,保证发动机的安全可靠使用。

3.1 加强航空发动机叶片研制生产的系统管理

航空发动机的研制生产使用是一个复杂的系统工程。解决航空发动机叶片技术质量问题,也必须采取系统管理的方法,综合研究发动机叶片设计、材料、工艺、使用等方面的情况,积极吸收和借鉴国外先进航空发动机研制、生产管理经验,研究适合我国国情的航空发动机研制管理模式、生产管理模式和使用管理模式,完善管理体制,从而加强航空发动机叶片设计、试验、生产过程的管理,不断提高叶片的质量和可靠性。建议有关部门组织进行系统、充分研究和综合论证,依托军用航空发动机发展的近期、中期和长期发展规划,制定航空发动机叶片技术发展计划,把航空发动机叶片技术纳入高新技术、关键技术项目进行发展。

3.2 加强航空发动机叶片的预研和研制

航空发动机叶片的预研,是发动机型号研制、测绘仿制、使用发展的基础之一。没有预研的基础和技术储备,就会增加型号的风险和周期,增大解决叶片质量问题的难度。要加强叶片预研的规划计划,进行综合论证,明确预研经费渠道,加大预研投入,逐步建立我国航空发动机叶片、叶栅的设计数据库,在此基础上,将这些预研技术充分应用到航空发动机型号研制、改进改型、测绘仿制过程中,应用到航空发动机叶片技术质量问题解决过程中。

在航空发动机型号研制过程中,要提高叶片设计计算水平,加强计算机软件的研究、开发与引进。要加大对试验设备技术改造的力度,开发先进的测试试验技术,提高叶片试验水平。要积极开展对外交流与合作,引进和吸收航空叶片研制设计先进技术,努力缩短与先进

国家的差距,实现航空发动机叶片技术的跨越式发展。在军用航空发动机设计准则中,要明确叶片的设计规范,明确叶片可靠性和维修性指标选定原则,按规范严格进行结构设计、试验、验证考核等工作。要加强叶片工艺可达性的研究,使设计与工艺达到良好的结合。在航空发动机测绘仿制及改进改型过程中,对关键、重要的叶片,要进行充分的计算、试验,消化吃透叶片设计技术,再进行叶片反设计工作。

3.3 加强航空发动机叶片生产过程的工艺管理

要加强叶片生产过程工艺先进性、工艺成熟性等方面的研究,促进航空发动机叶片生产工艺的发展,使叶片工艺能够满足设计的要求,满足生产的需要。要加强叶片工艺攻关,开展诸如计算机模拟工艺技术等前沿技术的研究,提高工艺水平,掌握航空发动机叶片冶金技术、加工制造技术等关键技术,推动工艺进步。加强叶片材料工程的基础研究和应用研究,完善材料性能数据和工艺数据,保证叶片内外质量的均匀性、一致性和稳定性,减小叶片性能数据的分散度。加强叶片工艺管理,细化叶片工艺规程。结合航空发动机型号研制,要进一步有重点地加大航空发动机叶片生产线设备改造、技术改造的投入力度,采用先进工艺,提高叶片加工水平。企业应主动进行叶片生产线技术改造,更新陈旧设备,保持技术状态良好,提高叶片制造精度和叶片质量。

3.4 加强航空发动机叶片研制生产过程的质量管理

要加强叶片生产过程的质量控制,加强对叶片表面完整性的研究,研究采取质量控制措施,完善叶片生产过程质量检测手段与方法,保证检测方法有效可行。要制定完善叶片加工制造过程的设计、工艺、检验标准样件,加强对叶片特种工艺、关键工序过程的质量控制,按标准要求编制作业指导书,细化检验要求。

3.5 加强对在役航空发动机叶片的系统分析研究

针对目前航空发动机叶片故障较多的情况,要加大投入,设立航空发动机叶片故障研究处理专项经费,进一步深入开展航空发动机叶片故障的系统分析研究,研究并掌握发动机叶片故障的规律,尤其重点开展与叶片振动特性有关的系统研究,针对故障模式开展叶片反设计、故障再现、试验验证等研究,积极采取预防性措施,促进发动机叶片技术不断成熟,不断提高航空发动机的可靠性。要研究制定航空发动机失效分析程序,使故障分析查处工作规范化,建立航空发动机故障分析专家库。建议在航空发动机系统和外场使用部队建设技术质量信息网络,推广应用“航空发动机可靠性指标和数据库系统”,加强航空发动机叶片故障和技术质量问题的收集分析,加强信息交流与利用,实现技术质量信息共享。建议加强在役航空发动机使用载荷谱数据的收集、交流和利用。加强航空发动机叶片在外场使用中原位探伤、原位修理的研究,系统开展检测周期、损伤容限等方面相关研究,提高发动机维修性和可靠性。航空发动机研制、生产单位要加强叶片修理技术的研究,并加强与发动机修理企业的技术质量交流,不断提高航空发动机修理质量。

黎明航空发动机公司批生产在役 发动机叶片故障及改进措施

黎明航空发动机公司，驻黎明航空发动机公司军代表室

1 前言

航空发动机是飞机的“心脏”，而叶片又是航空发动机的关键部件，因此叶片的制造质量和性能就成为影响发动机乃至飞机性能的关键因素之一。由于发动机叶片在工作时受到气流的冲击、高温燃气腐蚀、热应力等的综合作用，因此对叶片的制造质量和性能提出了很高的要求。近几年来，我公司制造的发动机叶片断裂故障时有发生。为保证飞行安全并提高发动机工作可靠性，我们做了进一步的研究工作，至今还在进行之中。本文将近几年来发动机叶片的断裂故障进行了总结及分析，并对几类典型故障应采取的措施进行了详细的阐述，旨在为今后解决此类问题，并进一步避免此类故障的发生积累经验。

2 典型故障情况、故障原因及改进措施

2.1 WP6 甲压气机三级转子叶片断裂故障

2.1.1 故障情况

WP6 甲系列发动机压气机三级转子叶片断裂故障，是从 WP6 原型机带来的老故障。在原型机上曾采取了调频、喷丸等措施，使故障率大大降低，但未能彻底解决。改甲型机后，由于负荷加大，使三级工作叶片断裂故障的问题再度突出。由于大改方案（比如更改二级静子叶片数）难以实行，所以只能从多方面挖潜改进，以求控制三级转子叶片断裂故障的发生。包括第二次调频改进、限频使用，以及其后的两次降低限频值、两次提高慢车转速、加强叶片表面加工质量控制和改进表面防护涂层等诸项措施。目前，此叶片断裂故障率已明显下降，但尚难根除，仍时有发生。

2.1.2 故障原因

据研究，WP6 甲系列发动机压气机三级转子叶片断裂故障的主要原因是慢车一扭共振。即慢车转速时，二级静子叶片尾迹所形成的激振频率，与三级转子叶片一扭固有频率相重合，而产生共振所致。腐蚀和打伤等因素加剧了故障的产生。

2.1.3 近期两部文件及贯彻情况

近期两部文件：

动联 [1998] 8 号批复，《关于对 WP6 甲发动机三级压气机叶片断裂问题的批复》；

[2001] 装订字第 166 号批复，《WP6 甲发动机压气机二至五级叶片贯彻改进涂层及进气支撑座加装隔热套管事》。

贯彻情况:

(1) 为贯彻动联 [1998] 8 号批复

1998 年 1 月 18 日, 以 P6AG017065 号更改单, 更改设计图 P6A01133。规定从 1998 年 1 月 1 日起, 新生产的三级叶片一扭自振频率控制在 1485Hz 以下 (车磨叶尖前), 并要求最终抛光的叶片进、排气边缘不允许有横向加工痕迹。

1998 年 1 月 18 日, 以 P6AGW7067 号更改单, 更改修理文件 P6A.XW.004。规定从 1998 年 1 月 1 日起, 大修机三级叶片一扭自振频率控制在 1492Hz 以下 (此前的控制值均比前述高 8Hz)。

1998 年 1 月 18 日, 以 P6AGW7066 号更改单, 更改测频说明书 P6A.SW.048。从 1998 年初已贯彻测频标准件由原来不校验改为每半年校验一次。

在三级叶片断裂故障仍时有发生的情况下, 再次降低了控频值:

2000 年 11 月 9 日批准发出 P6AG017359 号更改单, 更改设计图 P6A01133, 新品三级叶片一扭自振频率控制在 1470Hz 以下 (车磨叶尖前), 实际从 2001 年 1 月 1 日起贯彻执行。

2000 年 11 月 9 日批准发出 P6AGW7360 号更改单, 更改修理文件 P6A.XW.004, 大修机三级叶片一扭自振频率控制在 1477Hz 以下, 实际从 2001 年 1 月 1 日起贯彻执行。

(2) 为贯彻 [2001] 装订字第 166 号批复

2002 年 1 月 15 日批准发出第 P6AG017394/7391/7393/7392 号四份更改单, 将二至五级铝叶片设计图 P6A01132A/133/134/135 表面防护涂层由 “7011” 漆改为新研制的 “叶片绿色防腐涂层 (2001)”, 并规定从 2002 年 1 月 1 日开始执行。

2002 年 1 月 15 日向 5702 厂、5711 厂技术处发出黎技设函 [2002] 002 号技术通知, 通报上述二至五级铝叶片设计图表面防护涂层的更改情况, 并说明 “大修机叶片涂层按设计图要求执行”。

2.1.4 关于提高慢车转速

第一次, 由 $4100_{+200}^{\text{r/min}}$ 提高到 $4300_{-100}^{\text{r/min}}$, 1989 年发出国内通报号: P6A-89-410-8; 国外通报号: WP6A-0000-L004。

第二次, 由 $4300_{-100}^{\text{r/min}}$ 提高到 $4500_{-100}^{\text{r/min}}$, 1996 年 10 月发出国内通报号: P6A-96-410-11; 1997 年 1 月发出国外通报号: WP6A-0000-L005。国内从 1997 年 2 月开始实施。

综上所述, 动联 [1998] 8 号批复《关于对 WP6 甲发动机三级压气机叶片断裂问题的批复》和 [2001] 装订字第 166 号批复《WP6 甲发动机压气机二至五级叶片贯彻改进涂层及进气支撑座加装隔热套管事》中所要求的与三级压气机叶片断裂故障有关的措施已全部得到贯彻落实。

2.2 WP6 甲发动机压气机四级转子叶片榫头断裂故障

2.2.1 故障情况

1999 年 11 月至 2000 年 11 月的一年间, 集中发生了 4 起 7 片 WP6 甲 (03) 压气机第四级转子叶片疲劳折断故障, 其中除一起伴随有 3 片断在叶身 2/3 叶高处外, 其余都有 1 片断在榫头部位, 并具有明显的共同特点:

(1) 均发生在四次大修以后的发动机上, 总寿命都在 460 小时以上;

(2) 断口为高周疲劳, 疲劳源集中在榫头上叶背侧距前端面 12~22mm 之间、约 2/3 榫