

# 为新型飞机研制提供《AFFD》技术

航空航天部《AFFD》系统工程

王俊扬 郑旻仲

## AFFD TECHNOLOGY FOR NEW AIRPLANE DESIGN

AFFD Engineering System of the Ministry of Aeronautics and Astronautics

Wang Junyang and Zheng Minzhong

**摘要** 本文简要地介绍了航空航天部《AFFD》系统工程的人员组成、研究方向、课题设置及主要的技术指标。《AFFD》是“飞机结构抗疲劳与断裂设计”的简称,这一设计技术的发展,必将对提高飞机结构的安全性、耐久性、可靠性及经济性产生深远的影响。

**关键词** 抗疲劳与断裂设计, 耐久性, 可靠性, 经济性, 完整性。

**Abstract** In this paper, the membership, the research object, the topic terms and the main technology targets for 《AFFD》 engineering system of the Ministry of Aeronautics and Astronautics are briefly introduced. 《AFFD》 is an abbreviation for Anti-fatigue and Fracture Design. The development of this design technology will profoundly affect on safety, durability, reliability, economy and integrity of airplane structures.

**Key words** anti-fatigue and fracture design, durability, reliability, economy, integrity.

《AFFD》技术是航空航天部重点攻关预研课题。其主要目的是为新型军用和民用飞机研制提供成套抗疲劳与断裂设计技术。

整个研究工作是在航空航天部科技研究院和民机系统工程司领导下开展的,由航空航天部内外20个单位约250名研究人员组成的技术实体来承担,其中高级研究人员占60%左右。飞机结构强度研究所为负责单位,航空航天部聘请王俊扬研究员级高级工程师为《AFFD》系统工程主任工程师,在技术上、经济上对航空航天部负责。

整个研究工作分为三个阶段来完成。第一阶段(“七·五”期间)着重解决结构细节设计的抗疲劳与断裂技术,以便能有效地防止和(或)减缓裂纹的萌生和扩展以及止裂,并提供主要针对确定性裂纹的耐久性与损伤容限评定方法。第二阶段(“八·五”期间)着重解决结构疲劳与断裂破坏的概率控制,并提供由确定性裂纹扩展发展至多部位裂纹问题用概率断裂力学描述的满足可靠性设计要求的耐久性与损伤容限评定方法。第三阶段(“九·五”

1989年4月25日收到

期间)实现以结构疲劳与断裂破坏的概率控制为核心的满足飞机结构完整性要求的可靠性设计,以使研制的新型军、民机具有寿命长、可靠性高、经济性与维修性优良的特点,达到或接近国际先进水平。以上分三个阶段来实施的研究计划,可以归结为:“由抗疲劳与断裂技术的提供到破坏概率的控制直至实现满足完整性要求的可靠性设计”。简称为ACR计划。

目前“七·五”研究工作已全面开展并深化,可以为新型军、民机研制逐步提供的抗疲劳与断裂设计技术介绍如下。

### 1. 飞机结构紧固孔耐久性设计与质量控制技术

为了满足新型军用飞机采用耐久性设计技术的要求,《AFFD》系统工程开展了有关飞机结构耐久性设计技术研究,研究工作围绕结构典型细节展开,包括紧固孔、R区域、几何不连续部位及连接耳片等。预期从1988年度起可提供如下研究成果:

(1) 建立飞机结构耐久性设计和地面试验要求(含耐久性分布准则),目前这一研究成果已被即将颁布的国军标《军用飞机结构完整性大纲》所采用;

(2) 飞机结构紧固孔原始疲劳质量模型分析和试验方法,给出有关国产和美标航空材料的试验数据及原始疲劳质量控制技术;

(3) 用于构件或部件耐久性和经济寿命预测的分布方法及全套计算程序;

(4) 全尺寸飞机结构耐久性试验技术。

### 2. 若干实现长寿命、高可靠性起落架设计的技术

针对我国新型飞机研制中,起落架是比较薄弱环节,《AFFD》系统工程开展了有关长寿命、高可靠性起落架设计技术专题研究,并在“运八起落架延寿综合治理”和“抗疲劳与断裂技术在歼××起落架上的应用”研究中进行了实用考核。预期从1988年度起可提供如下研究成果:

(1) 结构细节耐久性设计要求和范例及现役飞机起落架抗疲劳与断裂图册;

(2) 结构耐久性与损伤容限设计原理与分析方法及裂纹扩展止裂技术;

(3) 起落架结构三维有限元应力分析程序系统及耐久性与损伤容限分析软件包,双腔缓冲器设计技术与分析程序及验证试验方法;

(4) 用于预测和改善起落架结构细节应力集中特性的光弹贴片修形试验方法;

(5) 在典型机场跑道上进行前起落架减摆性能验证试验的方法。研究改善飞机滑跑冲击和地面滑行操纵特性的起落架缓冲系统设计和分析程序及试验验证方法;

(6) 起落架结构及起落架收放系统及前轮操纵转弯系统的可靠性评估方法(含分析与试验);

(7) 定型机种起落架结构延寿综合治理技术等。

### 3. 飞机结构损伤容限评定技术

《AFFD》系统工程为了满足民用飞机开展损伤容限设计的需要,除了提供损伤容限评定的分析和试验方法外,还通过分析和试验研究探讨含有工程可检裂纹结构抗裂纹扩展能力。主要研究准静态裂纹扩展止裂技术(包括实现裂纹缓慢扩展技术),给出分析和试验方法及全套计算程序,提供可供工程使用的设计范例及有关曲线、图表和数据。同时也探讨动态裂纹失稳扩展止裂原理和方法,以及微裂纹的生成和扩展规律等。预期从1988年度起可提

供如下研究成果：

(1) 双轴应力下机身加筋板剩余强度弹塑性分析和试验方法及计算程序。改进机身加筋壁板裂纹扩展特性的技术措施及确定最佳结构参数配置方案的工程方法和计算程序。含多裂纹机身加筋壁板剩余强度分析的工程方法及计算程序；

(2) 孔洞及门框区域结构细节应力分析方法和计算程序。孔洞及门框区域结构具有最佳止裂特性参数配置方案的选择方法和计算程序；

(3) 铆缝孔边裂纹扩展止裂技术的设计原理、分析与试验方法及计算程序；

(4) 连接耳片损伤容限设计要求、分析和试验方法及计算程序。选择具有最佳止裂特性参数配置方案和高抗断裂结构型式连接耳片的方法和计算程序；

(5) 孔边角裂纹断裂韧度、门槛值及近门槛区裂纹扩展速率测试技术，以及近门槛区裂纹扩展公式的选定与系数拟合；

(6) 剪切屈曲疲劳分析和试验方法及计算程序；

(7) 典型结构（如加筋壁板）用动态止裂的概念进行损伤容限设计的原理、分析与试验方法及计算程序等。

以上所提供的损伤容限评定技术也同样适用于军用飞机结构。

#### 4. 离散源损伤容限评定技术

为了提供民用飞机设计中所需的离散源损伤容限评定技术，《AFFD》系统工程中设置了“离散源损伤破坏控制技术”研究课题，主要研究内容包括：设计准则和评定要求制定；含损伤结构的强度与刚度分析方法；试验验证标准与试验方法及测试技术等。其主要技术指标为：

(1) 制定设计准则，离散源损伤评估要求和使用技术说明；

(2) 给出离散源损伤试验标准及分析与试验方法和有关的计算程序、曲线、图表和数据等；

(3) 常用航空材料撞击状态材料性能数据测定（包括压缩、疲劳与断裂性能数据），形成材料性能数据手册。

#### 5. 结构可靠性评估技术

由于民用飞机结构的寿命和可靠性要求比军用飞机苛刻。因此，适用于民机的结构可靠性评估技术，也必然适用于军机。

为了满足民用飞机研制过程中开展可靠性评定工作的需要，《AFFD》系统工程中设置了“飞机结构可靠性设计技术”研究课题。第一期工程的主要技术指标为：

(1) 形成飞机结构可靠性设计思想体系，制定飞机结构可靠性评估（含功能性可靠性评估）暂行条例及其使用技术说明；

(2) 建立飞机结构可靠性数据库；

(3) 开展典型功能结构系统可靠性评估的应用研究，提供通用的可靠性评估的分析和试验方法；

(4) 提供新型飞机结构完整性设计中可靠性评估的分析和试验方法。

#### 6. 抗疲劳与断裂强化技术

采用强化技术可以在不增加飞机结构重量的基础上,较大幅度地提高飞机结构使用寿命。

《AFFD》系统工程研究的强化技术方法包括:孔壁冷挤压;干涉配合铆接;干涉配合螺栓;喷丸强化等。主要技术指标为:

(1) 成系列地开展强化技术方面的试验研究,确定最佳工艺参数,给出相应的 $S-N$ 曲线、 $a-N$ 曲线和 $da/dN-\Delta K$ 曲线,制定出相应的强化工艺指导性文件和生产规范;

(2) 给出可供工程使用的残余应力测定方法和分析方法及相应的计算程序,以及残余应力的试验测定值及分布曲线;

(3) 开展对残余应力元件的裂纹形成和扩展寿命计算方法研究,给出可供工程使用的裂纹形成和扩展寿命计算方法和相应的计算程序(包括应力强度因子计算方法和相应的计算程序);

(4) 开展对采用强化技术方法的典型结构的疲劳额定值(DFR)的测定及延寿增益的有效性和可靠性试验研究,给出试验结果(包括:曲线、图表和数据等)。

### 7. 磨蚀疲劳损伤防护技术

对于民用飞机增压机身,特别是各种舱门的开口区域附近的铆接结构,使用过程中会出现微动以促使疲劳裂纹的萌生并加快裂纹的早期扩展。对于这种现象我们称之为磨蚀疲劳损伤。特别对于采用张力场理论设计的机身结构问题就更加严重。因此,为了改善民用飞机增压机身结构耐久性,提高使用寿命,必须采用有效的磨蚀疲劳损伤防护技术,当然这一技术也适用于螺栓连接件和耳片处。

《AFFD》系统工程从1986年起开展了大量的试验研究以寻求最佳的磨蚀疲劳损伤防护措施。1988年度起这项研究工作进入向运七飞机机身结构移植阶段,并进行实用效果考核试验,1989年度起将推广应用于其它机种(如运八C飞机)机身结构。在取得成果后向新型民用机推广应用。

### 8. 激光辐照延寿技术

激光辐照技术是一种提高零件或构件抗疲劳与断裂性能极为有效的方法。经过激光辐照可使材料无裂纹寿命增长,提高材料的断裂韧度和裂纹扩展门槛值,降低材料的裂纹扩展速率;对于已发现的细小缺陷经过辐照,可以消除缺陷并给以强化,达到或超过材料本体的抗疲劳与断裂能力。为了能在新型飞机研制和现役飞机维修过程中推广应用这一技术,《AFFD》系统工程设置了“激光辐照延寿技术”研究课题,其主要技术指标为:

(1) 提供若干种航空常用金属材料最佳激光辐照参量(要求疲劳寿命提高1~2倍以上)给出相应的 $S-N$ 曲线、 $a-N$ 曲线和 $da/dN-\Delta K$ 曲线,制定出相应的工艺规范;

(2) 完成若干典型结构件的延寿治理,并通过疲劳与损伤容限试验以证实激光辐照的延寿效果;

(3) 给出可供工程使用的辐照参量对裂纹形成和扩展寿命影响规律的表达式,以估算激光辐照后的延寿增益。

目前我们已完成了对两种金属材料的最佳辐照参量筛选的试验研究,以及重复性检查的可靠性研究。

### 9. 结构胶贴法止裂技术

胶贴止裂法是一项有效的修补技术，不但可以用于对全尺寸结构的疲劳和损伤容限试验件进行修补，也可用于对使用中出现疲劳裂纹的结构进行修补。经修补后的结构其抗疲劳和断裂特性显著提高，因此，具有广泛的工程应用前景。

为了能在国内外尽快地推广应用这一技术，《AFFD》系统工程设置了“飞机结构胶贴法止裂技术”研究课题，其主要技术指标为：

(1) 探讨飞机结构胶贴止裂设计原理、分析与试验方法，给出有关设计曲线、图表、数据和计算程序；

(2) 选用和（或）研制适用的胶粘剂配方和贴胶的工艺方法；

(3) 完成典型结构胶贴止裂效果试验和可靠性试验，提出工程实施方案和技术论证报告。

### 10. 为农林机研制提供有关抗坠撞损伤设计和腐蚀疲劳损伤防护技术

依据研制农林机的急需，《AFFD》系统工程从1988年度开展有关“飞机结构抗坠撞损伤设计技术”和“腐蚀疲劳与腐蚀疲劳损伤防护技术”研究，其主要技术指标为：

(1) 农林机抗坠撞损伤设计准则；

(2) 飞机结构抗坠撞损伤有限元分析程序系统；

(3) 飞机结构抗坠撞损伤试验验证技术；

(4) 农林机结构抗腐蚀疲劳损伤设计准则；

(5) 农林机疲劳载荷-环境谱编制；

(6) 结构防腐蚀涂层材料选择。

### 11. 定型機種若干典型结构延寿综合治理

“七·五”期间开展如下项目的研究工作：

(1) 抗疲劳与断裂技术在歼××起落架上的应用研究；

(2) 歼教×机翼主梁寿命与可靠性综合治理；

(3) 运八起落架延寿综合治理；

(4) 运七机身隔框与地板梁连接接头延寿综合治理。

《AFFD》系统工程愿意为设计、生产、使用部门广泛地提供《AFFD》技术服务。同时也热忱地欢迎来自国内外专家和同行的帮助、批评及指教，以使《AFFD》系统工程的研究工作进一步地发展及深化，为振兴我国的航空工业贡献更多更大的力量。

### 参 考 文 献

1 航空工业部民机局。民用飞机设计要求。1987

2 航空工业部科学技术委员会编著。飞机结构损伤容限设计指南。航空工业出版社，1985