

民机结构耐久性与损伤容限设计手册

(下册)

· 损伤容限设计与分析 ·

《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》 编委会

航空工业出版社

# 民机结构耐久性与损伤容限 设计手册

(下 册)

损伤容限设计与分析

《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》编委会

航空工业出版社

ISBN 7-80183-165-9



## 内 容 提 要

9 787801 831651 >

本手册共分为上下两册,上册为疲劳设计与分析,下册为损伤容限设计与分析。本书为下册,共分 11 章,介绍了损伤容限设计要求、损伤容限设计原则以及损伤容限评定步骤,同时介绍损伤容限分析与评定方法,包括典型开裂模式、应力强度因子选取、裂纹扩展与剩余强度分析方法、损伤检测与损伤评定、结构检查大纲制定,手册中提供了大量的图表、曲线和宝贵的工程经验数据,可直接用于民机结构损伤容限设计。最后一章对与手册配套的分析软件系统的功能进行了介绍。

本手册可直接供从事民用飞机结构设计和强度分析人员对新支线客机进行损伤容限设计与分析使用,也可供军用飞机研制和其他工业部门从事损伤容限设计的人员以及高等院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

民机结构耐久性与损伤容限设计手册.下册,损伤容限设计与分析/郑晓玲主编;  
张民孚分册主编. —北京:航空工业出版社,2003.6

ISBN 7-80183-165-9

I. 民… II. ①郑…②张… III. ①民用飞机-飞机构件-损伤-结构设计-  
技术手册②民用飞机-飞机构件-损伤-结构分析-技术手册 IV. V215.5-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 047069 号

责任编辑:姚立 技术编辑:李力 封面设计:麦醒媛

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)

北京地质印刷厂印刷

内部发行

2003 年 6 月第 1 版

2003 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 25

字数: 640 千字

印数: 1—500

定价: 80.00 元

ISBN 7-80183-165-9  
V·021

## 前 言

随着航空科学技术的飞速发展，为满足飞机综合性能不断提高的客观需求，飞机结构设计思想不断更新，长寿命、高可靠性、高出勤率和低维修成本的综合要求已成为现代飞机结构设计的一项极为重要而必须遵循的准则。对于民机而言，安全是永恒的主题，是结构设计的基本要求，长寿命、低维修成本构成的经济性是实现其市场价值的保证，而结构耐久性与损伤容限设计则是达到上述要求的重要设计原则与方法。当前，我国正在研制新支线客机，为保证其研制符合适航规章对结构的规定，并达到研制的寿命指标，迫切需要编写一部与之对应的《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》作为结构设计工作的指导，这就是本手册编写的背景与目的。

结构耐久性是飞机结构抵抗疲劳开裂、腐蚀、热退化、剥离和外来物损伤作用的能力，而抵抗疲劳开裂的能力是其中最主要的部分，它表现为飞机结构在使用条件下的寿命。耐久性评定的方法主要包括疲劳分析的方法和概率断裂力学分析的方法。目前，国内外民机结构耐久性评定主要采用的是疲劳分析的细节疲劳额定值(DFR)方法，因此，本手册仍以疲劳分析方法作为耐久性分析的基本方法，但也从发展的角度，介绍了耐久性设计与耐久性经济寿命的概念。疲劳分析的主要目的是实现结构的长寿命，对少数不能实现损伤容限要求的不可检结构而言，它还承担着保证安全性的作用。损伤容限设计承认结构中存在着未被发现的初始缺陷，要求在使用过程的重复载荷作用下，缺陷(裂纹)的增长应控制在一定范围内，在规定的检查间隔内，结构满足规定的剩余强度要求，以便能通过有效的检查、维修保证结构在使用寿命期内不发生灾难性的破坏。因此，损伤容限设计是结构安全性的主要保证。

本手册以原《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》(JNS手册)为蓝本，增加了适应新支线客机结构特点，考虑了CCAR/FAR 25部新版本要求，吸取了国内外已有的成熟经验，通过理论和试验研究补充了新的技术内容和经验证过的数据与图表，评定方法也有相应的发展，同时编制了配套的软件系统。在手册内容的编排上考虑了设计人

员的使用方便，调整了手册的结构，力求做到内容系统、全面，与国外先进评定技术接轨，使手册具有很强的实用性、可靠性与先进性。

本手册共分为上下两册，上册为疲劳设计与分析，下册为损伤容限设计与分析。

上册共有 8 章。第 1 章简单介绍了疲劳分析基本要求和步骤，以及耐久性设计概念。第 2 章从结构设计角度出发规定了提高结构耐久性设计质量的具体措施，包括合理选材、结构布局、结构细节设计的一般原则、抗疲劳工艺方法、防腐蚀设计措施等。第 3 章规定了民用运输机的标准使用情况以及载荷谱的构成，给出了飞机机动谱、阵风谱和地面谱以及相应的当量载荷谱，规定了各部件的分析范围。第 4 章结构细节应力分析，介绍了进行结构细节应力分析的有限元素法和解析法，给出了紧固件柔度系数和几何应力集中系数的确定方法。第 5 章结构细节疲劳额定值，给出了疲劳额定值 DFR 的定义，确定许用值的计算方法、公式和考虑孔充填、表面处理、埋头深度等因素的各种修正系数，以及典型 DFR 许用值的算例，并提供了国内外材料的截止值、受拉、受剪、双向受载及机身蒙皮大开口等的许用值。第 6 章可靠性系数和可靠性准则，叙述了疲劳可靠性系数和可靠性准则，给出了双参数威布尔分布的特征寿命计算方法及有关的参数值。第 7 章介绍疲劳分析准则，给出了标准  $S-N$  曲线和公式以及地—空—地损伤图表，详细地介绍了疲劳分析 DFR 法的计算步骤，并用图表形式给出计算实例。最后一章疲劳分析软件功能简介，主要介绍与手册配套的软件系统及其运行环境与功能。

下册共有 11 章。第 1 章扼要叙述飞机结构损伤容限设计的基本原理、方法和准则，以及断裂力学最基本的概念和术语。第 2 章从结构设计角度介绍了提高结构损伤容限特征应采取的设计措施，为结构设计人员在结构设计中提供指南。第 3 章损伤容限评定步骤，介绍损伤容限评定和离散源损伤评定的步骤，为设计人员提供进行损伤容限评定的总体思路和提示以后各章的相互关系。第 4 章给出了民机结构若干典型开裂模式，并描述了它们从起裂至破坏的典型过程，给出各阶段的组合构形因子  $\beta_j$  和载荷再分配因子  $\beta_c$  的配置。第 5 章简单介绍了应力强度因子的定义和表达式，并提供了常用应力强度因子公式和曲线。第 6 章裂纹扩展分析，介绍了裂纹扩展分析的基本原理、计算步骤以及广布疲劳损伤分析方法。第 7 章剩余强度，介绍断裂准

则、剩余强度许用值以及剩余强度分析方法与步骤。第8章材料断裂性能，给出了国内外常用航空材料裂纹扩展速率与断裂韧度等数据与曲线，提供了不同厚度下断裂韧度  $K_{IC}$  值的经验公式，并简单介绍影响裂纹扩展速率的主要因素。第9章损伤检测和损伤评定，叙述了民机结构的主要损伤源和对各损伤源造成损伤的检测方法，并着重描述一种工程实用的损伤评定额定值系统，包括环境损伤额定值(EDR)、意外损伤额定值(ADR)和损伤容限额定值(DTR)，给出了对应的评定方法。第10章主要介绍结构检查大纲的目的、要求、组成、检查周期和检查内容，为设计人员提供制定结构检查大纲方法和指南。最后一章损伤容限设计与评定软件系统，简介与手册配套的软件系统及其运行环境与功能。

上下两册是一个相辅相成的有机整体，我们希望本手册在飞机结构设计中，对提高飞机安全性、长寿命、经济性、维修性和可靠性工作，将会起到重大促进作用。

本手册可直接用于新支线飞机结构设计和耐久性与损伤容限分析，也可供大型民用运输机结构设计和耐久性与损伤容限分析使用。对于高等院校飞机结构设计专业师生和从事飞机维修的技术人员也有一定的参考价值。

本手册在整个编写过程中，还有许多设计人员、试验研究人员参加，他们为手册提供了宝贵的资料、设计数据和试验数据。同时也得到了国防科工委系统三司、中国航空工业第一集团公司科技部民机处大力支持和指导，在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平所限，本手册难免有不足乃至错误之处，敬请各方面专家和读者予以指正。

**编者**

2003年6月

# 《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》

## 总 编 审 委 员 会

总 编 郑晓玲

副总编 (按姓氏笔画顺序)

刘文珽 李令芳 孟繁沛 张民孚

张伯年 秦福光 傅祥炯 薛景川

总 审 高镇同

副总审 陈一坚 郑作棣 王德明 吴学仁

# 《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》

(下册)

## 损伤容限设计与分析

### 编 审 人 员

主 编 张民孚  
主 校 傅祥炯  
主 审 高镇同 陈一坚 吴学仁  
编 委 (按姓氏笔画顺序)  
王生楠 王立新 李 勇 李亚智  
徐仲年 张联营 张民孚 郑旻仲  
郑晓玲 周岳泉 费斌军 黄其青  
傅祥炯 斯而健

### 编 校 人 员

| 章号    | 编写          | 校对  |
|-------|-------------|-----|
| 符号和术语 | 傅祥炯         | 张民孚 |
| 1     | 傅祥炯 费斌军     | 张联营 |
| 2     | 张民孚 徐仲年     | 张联营 |
| 3     | 傅祥炯         | 张民孚 |
| 4     | 黄其青         | 斯而健 |
| 5     | 黄其青 李亚智 傅祥炯 | 张民孚 |
| 6     | 周岳泉 张保法     | 斯而健 |
| 7     | 李亚智 郑旻仲     | 张民孚 |
| 8     | 傅祥炯         | 徐仲年 |
| 9     | 斯而健         | 张民孚 |
| 10    | 斯而健         | 张民孚 |
| 11    | 王生楠         | 李 健 |



## 符号、缩略语和术语

## 符 号

|           |   |
|-----------|---|
| $A$       | 面积( $\text{mm}^2$ )   |
| $a$       | 裂纹长度( $\text{mm}$ )   |
| $a_0$     | (1) 初始裂纹长度( $\text{mm}$ )<br>(2) 对应于给定检查级别和检查方法的可检裂纹门槛值( $\text{mm}$ )        |
| $a_f$     | 终止裂纹长度( $\text{mm}$ )   |
| $a_c$     | 临界裂纹长度( $\text{mm}$ )   |
| $a_y$     | 线弹性裂纹断裂准则适用的最小裂纹长度( $\text{mm}$ )   |
| $B$       | 框或长桁间距( $\text{mm}$ )   |
| $C$       | 材料裂纹扩展参数( $\text{MPa}^{-n} \cdot \text{m}^{(1-n/2)}$ )                        |
| $D, d$    | 圆孔直径( $\text{mm}$ )   |
| $E$       | 弹性模量( $\text{MPa}$ )  |
| $e$       | 偏心距( $\text{mm}$ )  |
| $F_e$     | 弹性紧固件柔度( $\text{mm}/\text{N}$ )   |
| $F_p$     | 塑性紧固件柔度( $\text{mm}/\text{N}$ )   |
| $H$       | (1) 高度, 高向尺寸( $\text{mm}$ )<br>(2) 正则化紧固件柔度( $H_e = F_e t E, H_p = F_p t E$ ) |
| $I$       | 惯性矩( $\text{mm}^4$ )  |
| $K_I$     | I型应力强度因子( $\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ )                                      |
| $K_{IC}$  | 平面应变断裂韧度( $\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ )                                      |
| $K_C$     | 由稳定裂纹扩展的起始裂纹长度和断裂失稳应力计算得出的表观断裂韧度( $\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ )              |
| $m$       | 反映正应力比影响的裂纹扩展材料参数   |
| $N$       | 以循环次数计数的疲劳寿命  |
| $N_f$     | 以飞行次数计数的疲劳寿命  |
| $N_0$     | 损伤检查周期<br>裂纹从 $a_0$ 扩展至 $a_c$ 的飞行次数   |
| $N_s$     | 一次飞行中应力的循环次数  |
| $\bar{N}$ | 平均检查间隔  |
| $n$       | 材料裂纹扩展指数  |
| $P_D$     | 检出损伤的累积概率<br>在某个期间内, 按所有检查级别从机队中至少查出一条裂纹的概率                                   |

|               |  |
|---------------|--|
| $P_d$         | 在某个期间内, 按某个检查级别从机队中至少查出一条裂纹的概率   |
| $P_s$         | 在一次检查中, 查出裂纹的概率  |
| $P_1$         | 检查到一架在所研究细节中带有损伤的飞机的概率   |
| $P_2$         | 检查到所研究细节的概率  |
| $P_3$         | 检查带损伤细节时, 检出损伤的概率  |
| $P_r$         | 在某个期间内, 从机队中检查出裂纹的概率   |
| $P_u$         | 典型紧固件剪切强度(kN)  |
| $p$           | (1)压力强度(MPa)<br>(2)间距或紧固件间距或平均间距(mm)                                       |
| $Q$           | 紧固件传剪能力 $Q = \frac{P_u}{dt}$ (MPa)   |
| $q$           | 反映负应力比影响的裂纹扩展材料参数  |
| $r_p$         | 塑性区尺寸(mm)  |
| $R$           | (1)裂纹扩展阻力(MPa $\sqrt{m}$ )<br>(2)应力比(最小应力与最大应力之比)<br>(3)曲率半径(mm)           |
| $R_s$         | 典型桁条与蒙皮的拉伸刚度比, $A_{st}/(Bt_{sk})$  |
| $R_{sp}$      | 对接桁条或梁缘条与典型桁条的拉伸刚度比, $A_{sp}/A_{st}$                                       |
| $S$           | 裂纹体应力额定值(MPa)  |
| $t$           | 厚度, 深度(mm)   |
| $U$           | (1)裂纹闭合参数<br>(2)桁条到自由边距离(mm)   |
| $W$           | 壁板宽度(mm)   |
| $\alpha$      | 裂纹检出概率曲线形状参数   |
| $\beta$       | 综合修正因子(无量纲应力强度因子), $\beta = \beta_J \cdot \beta_C = K/\sigma \sqrt{\pi a}$ |
| $\beta_J$     | 各种基本情况的组合构形因子, $\beta_J = J_i \cdot J_j \cdot J_k \cdots$                  |
| $\beta_C$     | 局部载荷再分配因子, $\beta_C = C_i$   |
| $\sigma$      | 正应力(MPa)   |
| $\sigma_b$    | 材料抗拉强度极限(MPa)  |
| $\sigma_{ys}$ | 材料拉伸屈服应力(MPa)  |
| $\lambda$     | 谱载效应因子<br>裂纹检出概率曲线三参数方程特征长度  |
| $\delta$      | 变形量(mm)  |
| $\omega$      | 裂尖塑性区尺寸(mm)  |
| [ ]           | 许用值, 例如剩余强度许用值 $[\sigma]_{rs}$ 等   |

## 下 标

|     |               |        |           |
|-----|---------------|--------|-----------|
| ar  | 止裂            | B      | 弯曲        |
| br  | 挤压            | eff    | 有效        |
| eq  | 当量            | fl     | 缘条        |
| g   | 毛(如毛应力, 毛面积等) | lf(LF) | 下缘条       |
| min | 最小            | max    | 最大        |
| n   | 净(如净应力, 净面积等) | ol(OL) | 超载        |
| ref | 参考            | req    | 要求        |
| sk  | 蒙皮            | rs     | 剩余(如剩余强度) |
| st  | 桁条            | sp     | 对接桁条      |
| to  | 总             | t, T   | 拉伸        |
| ult | 极限            | uf(UF) | 上缘条       |
| ys  | 屈服            | w      | 腹板        |

缩 略 语

|       |  |          |
|-------|--|----------|
| ADR   | Accidental Damage Rating                     | 意外损伤额定值  |
| DTR   | Damage Tolerance Rating                      | 损伤容限额定值  |
| DSPSE | Discrete Source Principal Structural Element | 离散源重要结构件 |
| EDR   | Environmental Deterioration Rating           | 环境损伤额定值  |
| MSD   | Multiple Site Damage                         | 多部位损伤    |
| MED   | Multiple Element Damage                      | 多元件损伤    |
| NDI   | Nondestructive Inspection                    | 无损检测     |
| PSE   | Principal Structural Element                 | 重要结构件    |
| SSI   | Structurally Significant Item                | 重要结构项目   |
| WFD   | Widespread Fatigue Damage                    | 广布疲劳损伤   |

## 术 语

**损伤容限** 在遭受疲劳、腐蚀、意外或离散源引起的定量损伤后，在一定使用期内，结构保持其剩余强度要求的能力。

**设计使用寿命** 设计和鉴定确定，以飞行次数、飞行小时数或日历年限计的一个期限，在该期限内，该结构能够安全、经济地使用而不会发生重大的破坏事故。

**重要结构件(PSE)** 是对承受飞行、地面和增压载荷有重要贡献的单元，它可以是一个元件，也可能是紧邻的多个元件组合体。该单元的完整性是整个飞机结构完整性的基础。它与维修中常用的重要结构项目(SSI)一致。

**单途径传力** 外载荷明显地通过单一元件承受，其破坏将导致整体结构承受外载荷能力的丧失。

**多途径传力** 当个别元件破坏后，其外载荷能安全地通过其余元件传递。整体结构布局属于超静定结构。

**广布疲劳损伤(WFD)** 多个细节部位同时存在具有足够尺寸和密度的裂纹，致使结构不再满足剩余强度要求。WFD具有两种表现形式：

- 多部位损伤(MSD) 在同一结构元件中同时存在多条疲劳裂纹的一种 WFD，这些裂纹彼此独立或合并，共同导致不满足剩余强度要求。
- 元件损伤(MED) 相邻诸结构元件中同时存在多条裂纹的一种 WFD，这些裂纹相互影响和发展，导致不满足剩余强度要求。

**开裂模式** 结构细节内可能产生的各种开裂形式，本手册中推荐了若干具有代表性的典型开裂模式作为损伤容限评定的基础。

## 目 录

|                               |       |                             |        |
|-------------------------------|-------|-----------------------------|--------|
| <b>第 1 章 损伤容限设计要求</b> .....   | ( 1 ) | 2.6 减缓裂纹扩展速率的工艺措施 .....     | (29)   |
| 1.1 断裂力学基础 .....              | ( 1 ) | 2.6.1 强化技术的选用原则 .....       | (29)   |
| 1.1.1 概述 .....                | ( 1 ) | 2.6.2 强化技术应用条件 .....        | (29)   |
| 1.1.2 裂纹体受载模式 .....           | ( 1 ) | 2.7 可检性和维修性设计 .....         | (30)   |
| 1.1.3 裂纹尖端应力场 .....           | ( 1 ) | 2.7.1 一般要求 .....            | (30)   |
| 1.1.4 应力强度因子 .....            | ( 2 ) | 2.7.2 可检性设计实例 .....         | (30)   |
| 1.1.5 断裂准则—— $K$ 准则 .....     | ( 3 ) | 2.8 腐蚀防护措施 .....            | (32)   |
| 1.1.6 裂纹尖端塑性区 .....           | ( 3 ) | 2.8.1 合理地选择材料 .....         | (32)   |
| 1.1.7 裂纹扩展速率 .....            | ( 4 ) | 2.8.2 合理的材料接触 .....         | (32)   |
| 1.1.8 变幅载荷对裂纹扩展的影响 .....      | ( 5 ) | 2.8.3 密封、防水和排水 .....        | (33)   |
| 1.2 损伤容限原理 .....              | ( 6 ) | 2.8.4 镀层和涂层保护 .....         | (34)   |
| 1.2.1 飞机结构主要损伤源 .....         | ( 6 ) | <b>第 3 章 损伤容限评定步骤</b> ..... | (35)   |
| 1.2.2 损伤容限工程 .....            | ( 7 ) | 3.1 损伤容限评定步骤 .....          | (35)   |
| 1.2.3 损伤容限设计目的 .....          | ( 8 ) | 3.1.1 评定框图 .....            | (35)   |
| 1.2.4 损伤容限设计要素 .....          | ( 8 ) | 3.1.2 评定步骤 .....            | (35)   |
| 1.2.5 结构类型 .....              | (10)  | 3.2 损伤容限(离散源)评定步骤 .....     | (42)   |
| 1.3 损伤容限设计要求 .....            | (14)  | 3.2.1 评定框图 .....            | (42)   |
| 1.3.1 适航条例 .....              | (14)  | 3.2.2 评定步骤 .....            | (42)   |
| 1.3.2 重要结构件(PSE)的选择 .....     | (15)  | <b>第 4 章 典型开裂模式</b> .....   | ( 44 ) |
| 1.3.3 剩余强度载荷要求 .....          | (16)  | 4.1 简单连接结构 .....            | ( 45 ) |
| 1.3.4 载荷/环境谱 .....            | (16)  | 4.2 机翼及尾翼 .....             | ( 46 ) |
| 1.3.5 最大损伤范围 .....            | (16)  | 4.2.1 典型蒙皮和 Z 型桁条加筋结构的      |        |
| 1.3.6 初始损伤假设 .....            | (18)  | 开裂 .....                    | ( 46 ) |
| 1.3.7 广布疲劳损伤假设 .....          | (19)  | 4.2.2 典型蒙皮和对接桁条结构的          |        |
| <b>第 2 章 损伤容限结构设计原则</b> ..... | (22)  | 开裂 .....                    | ( 47 ) |
| 2.1 基本要求 .....                | (22)  | 4.2.3 翼梁缘条和相连蒙皮开裂 .....     | ( 48 ) |
| 2.1.1 损伤容限结构设计特点 .....        | (22)  | 4.2.4 翼梁缘条和相连腹板开裂 .....     | ( 49 ) |
| 2.1.2 损伤容限结构设计措施 .....        | (22)  | 4.3 机身 .....                | ( 50 ) |
| 2.2 结构布局 .....                | (23)  | 4.3.1 机身上部蒙皮和帽型桁条           |        |
| 2.2.1 一般原则 .....              | (23)  | 开裂 .....                    | (50)   |
| 2.2.2 典型结构实例 .....            | (24)  | 4.3.2 主裂纹处于两桁条中央的机身         |        |
| 2.3 结构选材 .....                | (26)  | 蒙皮开裂 .....                  | ( 51 ) |
| 2.3.1 一般原则 .....              | (26)  | 4.3.3 对接铆钉排或桁条下方的机身蒙皮       |        |
| 2.3.2 典型实例 .....              | (26)  | 中央主裂纹 .....                 | ( 52 ) |
| 2.4 应力水平控制 .....              | (27)  | 4.3.4 框和止裂带破坏时的机身蒙皮         |        |
| 2.5 结构细节设计 .....              | (28)  | 裂纹 .....                    | ( 53 ) |

|                                    |         |                                     |         |
|------------------------------------|---------|-------------------------------------|---------|
| 4.4 无约束的缘条                         | ( 54 )  | 7.2 剩余强度分析原理                        | ( 273 ) |
| 4.4.1 整体单角型缘条的开裂                   | ( 54 )  | 7.2.1 破坏模式                          | ( 273 ) |
| 4.4.2 与腹板连接的单角型缘条的<br>开裂           | ( 55 )  | 7.2.2 破坏准则                          | ( 273 ) |
| 4.4.3 与腹板连接的单角型缘条和带<br>板的开裂        | ( 57 )  | 7.2.3 剩余强度分析的一般过程                   | ( 274 ) |
| 4.4.4 整体 T 型缘条开裂                   | ( 61 )  | 7.2.4 组合结构剩余强度分析要点                  | ( 275 ) |
| 4.4.5 与腹板连接的双角型缘条的<br>开裂           | ( 62 )  | 7.3 剩余强度许用值                         | ( 277 ) |
| <b>第 5 章 应力强度因子</b>                | ( 63 )  | 7.3.1 适用结构情况分类                      | ( 277 ) |
| 5.1 应力强度因子的确定                      | ( 63 )  | 7.3.2 一般结构剩余强度许用值                   | ( 277 ) |
| 5.2 综合修正因子 $\beta$                 | ( 63 )  | 7.3.3 耳片结构剩余强度许用值                   | ( 278 ) |
| 5.3 民机典型结构情况 $\beta_J$ 及 $\beta_C$ | ( 65 )  | 7.3.4 多部位损伤连通剩余强度许用值<br>(多裂纹连通临界载荷) | ( 279 ) |
| 5.4 $J$ 因子及 $C$ 因子                 | ( 93 )  | 7.4 剩余强度分析步骤                        | ( 280 ) |
| 5.4.1 简单情况                         | ( 96 )  | 7.4.1 一般结构剩余强度分析步骤                  | ( 280 ) |
| 5.4.2 载荷影响                         | ( 122 ) | 7.4.2 耳片结构剩余强度分析步骤                  | ( 282 ) |
| 5.4.3 圆柱及杆件                        | ( 132 ) | 7.5 剩余强度分析算例                        | ( 282 ) |
| 5.4.4 耳片                           | ( 139 ) | <b>第 8 章 材料性能</b>                   | ( 288 ) |
| 5.4.5 机翼和尾翼                        | ( 141 ) | 8.1 影响裂纹扩展的主要因素                     | ( 288 ) |
| 5.4.6 机身结构                         | ( 216 ) | 8.1.1 合金成分及热处理                      | ( 288 ) |
| <b>第 6 章 裂纹扩展分析</b>                | ( 254 ) | 8.1.2 成型方式和材料取向                     | ( 289 ) |
| 6.1 基本原理                           | ( 254 ) | 8.1.3 厚度                            | ( 289 ) |
| 6.1.1 等幅裂纹扩展模型                     | ( 254 ) | 8.1.4 温度                            | ( 289 ) |
| 6.1.2 变幅载荷下裂纹扩展模型                  | ( 255 ) | 8.1.5 腐蚀介质                          | ( 289 ) |
| 6.1.3 裂纹扩展寿命                       | ( 257 ) | 8.1.6 波形和频率                         | ( 292 ) |
| 6.2 裂纹扩展寿命计算步骤及实例                  | ( 260 ) | 8.1.7 载荷类型                          | ( 292 ) |
| 6.2.1 裂纹扩展寿命计算流程图                  | ( 260 ) | 8.2 断裂韧度                            | ( 292 ) |
| 6.2.2 裂纹扩展计算步骤                     | ( 260 ) | 8.2.1 平面应变断裂韧度 $K_{IC}$             | ( 292 ) |
| 6.2.3 计算实例                         | ( 262 ) | 8.2.2 平面应力和过渡阶段的断裂韧度<br>$K_C$       | ( 296 ) |
| 6.3 广布疲劳损伤分析方法                     | ( 264 ) | 8.2.3 断裂韧度标准化曲线                     | ( 296 ) |
| 6.3.1 工程试凑法                        | ( 265 ) | 8.3 裂纹扩展及超载迟滞                       | ( 297 ) |
| 6.3.2 变量优化法                        | ( 265 ) | 8.3.1 裂纹扩展基本公式                      | ( 297 ) |
| 6.3.3 计算步骤                         | ( 266 ) | 8.3.2 超载截止比                         | ( 298 ) |
| 6.3.4 计算实例                         | ( 267 ) | 8.4 裂纹扩展门槛值 ( $\Delta K_{th}$ )     | ( 324 ) |
| 6.4 裂纹扩展分析中的应力谱                    | ( 269 ) | 8.5 应力腐蚀开裂门槛值                       | ( 325 ) |
| 6.4.1 谱的三要素                        | ( 270 ) | 8.5.1 $\sigma_{scc}$                | ( 325 ) |
| 6.4.2 高载截取和循环谱块大小的<br>选取           | ( 270 ) | 8.5.2 $K_{SCC}$ 和 $K_{ISCC}$        | ( 325 ) |
| 6.4.3 低载截除                         | ( 270 ) | 8.6 紧固件剪切许用值                        | ( 325 ) |
| 6.4.4 载荷顺序                         | ( 270 ) | 8.7 紧固件柔度系数                         | ( 326 ) |
| <b>第 7 章 剩余强度分析</b>                | ( 272 ) | 8.7.1 紧固件柔度                         | ( 326 ) |
| 7.1 剩余强度概要                         | ( 272 ) | 8.7.2 紧固件弹性柔度系数                     | ( 326 ) |
|                                    |         | 8.7.3 紧固件塑性柔度系数                     | ( 327 ) |
|                                    |         | <b>第 9 章 损伤检测和损伤评定</b>              | ( 329 ) |
|                                    |         | 9.1 结构损伤分析及其检测                      | ( 329 ) |

|  |              |   |              |
|--|--------------|---|--------------|
| 9.1.1 损伤的性质和检查要求 .....                     | (329)        | 10.3 结构检查大纲的组成 .....                      | (361)        |
| 9.1.2 损伤检测的方案和方法 .....                     | (330)        | 10.4 建立结构检查大纲的原则 .....                    | (362)        |
| 9.1.3 各种检测方法的检测概率曲线 .....                  | (331)        | 10.5 制定结构检查大纲的依据和<br>步骤 .....             | (362)        |
| 9.2 环境损伤和意外损伤的评定——<br>EDR 和 ADR 评定方法 ..... | (337)        | 10.5.1 制定结构检查大纲的依据 .....                  | (362)        |
| 9.2.1 EDR 评定原理及其指数确定 .....                 | (337)        | 10.5.2 制定结构检查大纲的步骤 .....                  | (363)        |
| 9.2.2 ADR 评定原理及其指数确定 .....                 | (338)        | 10.6 检查周期的确定 .....                        | (367)        |
| 9.2.3 EDR/ADR 评定的关键因素 .....                | (338)        | 10.6.1 首次检查期(阈值) .....                    | (367)        |
| 9.2.4 EDR/ADR 工作卡 .....                    | (338)        | 10.6.2 重复检查间隔 .....                       | (368)        |
| 9.2.5 EDR/ADR 系统应用的实例 .....                | (340)        | 10.7 结构检查大纲的编制 .....                      | (368)        |
| 9.3 疲劳损伤的评定——DTR 评定<br>方法 .....            | (344)        | 10.7.1 初始检查大纲 .....                       | (368)        |
| 9.3.1 DTR 评定原理 .....                       | (344)        | 10.7.2 补充检查大纲 .....                       | (370)        |
| 9.3.2 DTR 评定方法与步骤 .....                    | (349)        | 10.8 结构检查大纲实例 .....                       | (371)        |
| <b>第 10 章 结构检查大纲 .....</b>                 | <b>(361)</b> | <b>第 11 章 计算机辅助损伤容限设计与<br/>评定系统 .....</b> | <b>(376)</b> |
| 10.1 结构检查大纲的目的 .....                       | (361)        | 11.1 概述 .....                             | (376)        |
| 10.2 结构检查大纲的要求 .....                       | (361)        | 11.2 系统描述 .....                           | (376)        |
|  |              | 11.3 功能简介 .....                           | (377)        |



## 第 1 章 损伤容限设计要求

### 1.1 断裂力学基础

#### 1.1.1 概述

断裂力学是应用连续介质力学理论,研究含有裂纹物体在外载荷作用下的应力、应变规律和失效准则的科学。任何工程结构都不可避免地有类似裂纹的缺陷存在是断裂力学理论的前提。

断裂力学的两大重要分支是:线弹性断裂力学和弹塑性断裂力学。线弹性断裂力学主要研究裂纹尖端小范围屈服的断裂问题,它应用线弹性理论,通过分析含裂纹体的应力应变场,得到表征裂纹尖端应力应变强度的特征参数——应力强度因子  $K$ ;弹塑性断裂力学主要研究裂纹尖端大范围屈服和全范围屈服的断裂问题。和线弹性断裂力学相比,弹塑性断裂力学远未成熟,常用的参数有两种: $J$  积分表征参数和裂纹尖端张开位移 COD。这里主要介绍线弹性断裂力学的核心——应力强度因子理论。

#### 1.1.2 裂纹体受载模式

裂纹体通常承受三种形式的载荷。这三种基本形式的载荷,将产生三种基本的开裂类型(图 1-1)。

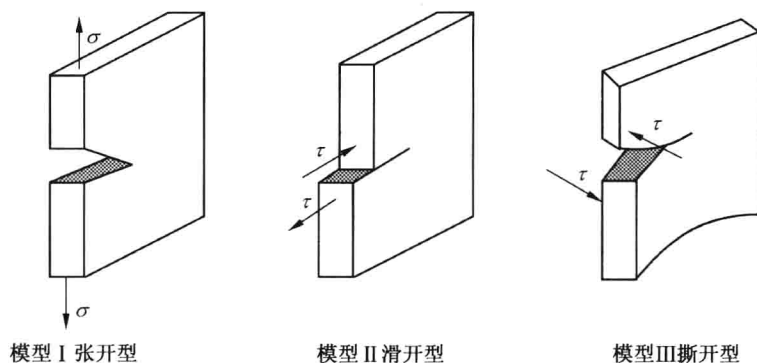


图 1-1 裂纹的基本开裂类型

I 型, 又称张开型, 受垂直于裂纹面的拉应力作用。

II 型, 又称滑开型, 受平行于裂纹面且垂直于裂纹前缘的剪应力作用。

III 型, 又称撕开型, 受平行于裂纹面且平行于裂纹前缘的剪应力作用。

在工程问题中最重要的是 I 型裂纹, 这里主要介绍 I 型裂纹问题, 对 II、III 型只作简单介绍。

#### 1.1.3 裂纹尖端应力场

对于线弹性断裂力学问题, 裂纹尖端附近( $r \rightarrow 0$ , 见图 1-2)的应力分量可以用弹性理