# 飞机结构多部位损伤发生的可能性分析

王传胜 张建宇 鲍 蕊 费斌军

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

**摘 要**: 基于疲劳统计学与断裂力学的基础,利用已有的飞机单细节结构试验结果,提出一种定量计算飞机结构发生多部位损伤(MSD,Multiple Site Damage)可能性的方法. 该方法简化了飞机结构发生 MSD 可能性的计算,为飞机结构的安全性评估提供基础. 该方法认为单细节的裂纹萌生寿命服从正态分布或对数正态分布. 对于多细节的飞机结构,到某一时刻,当 2 个或 2 个以上细节萌生裂纹时,则认为该结构发生了 MSD. 给出了具体的方法介绍和理论推导,并给出了一个具体的计算示例,得到 MSD 产生概率与应力水平的关系曲线. 计算结果表明,该方法计算合理,较符合实际情况,利于工程应用.

**关 键 词**: 结构;疲劳;可靠性;疲劳裂纹扩展;裂纹萌生

**中图分类号**: V 214.4; V215.7

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)08-0899-04

## Reliability analysis on structure with multiple site damage

Wang Chuansheng Zhang Jianyu Bao Rui Fei Binjun

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract**: A quantitative analysis method on the occurrence probability of MSD (multiple site damage) was presented based on the theory of statistics in fatigue and fracture mechanics and the existing experimental results. It predigested the calculation for the occurrence probability of MSD and provided reference for the evaluation of fatigue life of aircraft structures. It assumed that the initiating life of single crack follows logarithmic normal distribution or normal distribution according to existing research and experimental results. The assumption was rational and it didn't affect the foundation of calculation and theory. For the structures with multiple details, MSD in the structure happened when two or more than two details emanated cracks at certain time. According to these, method and formula were proposed. A numerical example and corresponding stress-MSD probability curve were given for the proposed approach. The result indicates that the method is reasonable and can be used in engineering.

**Key words**: structure; fatigue; reliability; crack propagation; crack initiation

## 1 多部位损伤(MSD)简介

近年来,无论在国内还是在国外,飞机老龄化的现象日趋严重,随之而兴起的对于多裂纹尤其是多部位损伤(MSD,Multiple Site Damage)问题的研究,也因此日益成为保证飞机结构可靠性的热点[1-3]. MSD 容易发生在同时存在多个易于产生疲劳源的飞机结构部位,如飞机蒙皮的搭接部位(如图 1). MSD 在飞机结构中的存在,会显著降低飞机结构的剩余强度,从而大大减少结构的使用寿命,甚至导致灾难性事故发生. 因此,有必要对其发生的可能性进行相应研究.

MSD 通常包括 2 种情况[4-5]:一种是没有明显主裂纹的情况,多细节结构在各细节的应力水平相差不是很大且没有意外损伤的情况下,易产生多个尺寸相差不大的裂纹同时存在的损伤,见图 2;另一种是含有明显主裂纹的 MSD 情况,是指多细节中某细节处的应力水平高出其它细节较

**收稿日期**: 2005-10-14

**作者简介**: 王传胜(1977-),男,辽宁普兰店人,博士生,wang12wang12@sohu.com.

多,或者由于发生意外损伤而导致出现某一细节的损伤远大于其它细节情况,见图 3. 这 2 种情况都是 MSD 研究的重点,而没有明显主裂纹的情况更易发生. 有主裂纹时,其裂纹扩展等特性更接近单裂纹的情况. 本文作为一种方法研究,只对前一种情况进行分析和预测,对于有主裂纹的情况,需要进行其它的方法和试验研究.

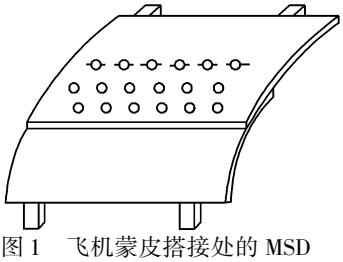


图 1 飞机蒙皮搭接处的 MSD

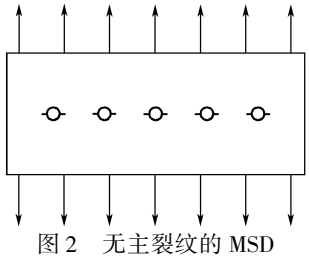


图 2 无主裂纹的 MSD

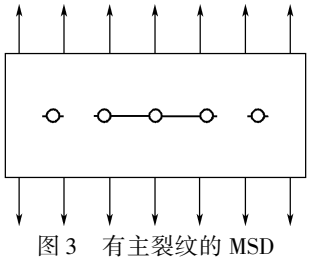


图 3 有主裂纹的 MSD

本文针对含有多细节的结构,基于疲劳统计学与断裂力学的基础,利用已有的飞机单细节结构试验结果,提出一种定量的计算飞机结构发生 MSD 可能性的方法,并给出计算实例.

## 2 单裂纹萌生的可能性

疲劳应用统计学[6-7]认为:飞机结构细节疲劳寿命近似服从正态分布或对数正态分布. 而疲劳寿命包括裂纹萌生寿命和裂纹扩展寿命. 通常情况下裂纹萌生寿命较裂纹扩展寿命要长许多,所以,也可以认为裂纹萌生寿命服从正态分布或对数正态分布. 在本文中,假设裂纹萌生寿命服从对数正态分布(其相应的参数可以由已有的试验获得),这种假设并不影响本文所述方法的讨论.

对于单一细节,裂纹萌生寿命服从对数正态分布,且该寿命与载荷大小相关:应力水平 $S$ 越高,寿命 $N$ 越短而分散性越小;应力水平越低,寿命越长而分散性越大. 如图 4 所示. 通常 $S$-$N$ 曲线可表达为式(1)的幂函数形式:

$$S^m \cdot N = C \tag{1}$$

其中,$S$ 为最大应力;$C$,$m$ 均为材料常数.

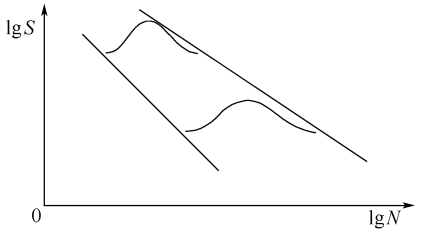



图 4 双对数坐标下的 $S$-$N$ 曲线

基于一定应力水平下单细节裂纹萌生寿命概率分布,在该应力水平下多细节结构某一时刻出现多个损伤的概率可以通过下述方法计算:

对于单一细节,如果裂纹萌生寿命的概率密度函数为 $f(\tau,\sigma)$,其中 $\sigma$ 为对数疲劳寿命标准差,则到 $t$ 时刻,该细节萌生裂纹的概率 $p = \int_0^t f(\tau,\sigma)\,\mathrm{d}\tau$. 因为疲劳裂纹萌生寿命与应力水平相关,不同的应力水平对应着不同的概率密度参数. 对于 $n$ 个相互独立的细节,如果其应力水平不同,则其概率密度分别为 $f_1(\tau,\sigma_1)$,$f_2(\tau,\sigma_1)$,$\cdots$,$f_n(\tau,\sigma_n)$. 到 $t$ 时刻,各个细节萌生裂纹的概率为

$$p_i = \int_0^t f_i(\tau,\sigma_i)\,\mathrm{d}\tau \qquad i = 1,2,\cdots,n \tag{2}$$

## 3 MSD 发生的可能性

一个含有 $n$ 个相互独立细节的结构,到 $t$ 时刻,所有细节都产生裂纹的可能性为

$$P = p_1 p_2 \cdots p_n = \prod_{i=1}^{n} p_i \tag{3}$$

该多细节结构从初始到 $t+\Delta t$ 的寿命期内,不出现裂纹的概率为

$$P_{\mathrm{D0}} = \prod_{i=1}^{n}(1-p_i) = \prod_{i=1}^{n}\left(1-\int_0^{t+\Delta t} f_i(\tau,\sigma_i)\,\mathrm{d}\tau\right) \tag{4}$$

在寿命期 $0 \sim t+\Delta t$ 的区间内,第 $i$ 个细节产生裂纹而其它细节不产生裂纹的概率为

$$\begin{aligned} P_{\mathrm{D}i} = {} & \int_0^{t_1} f_i(\tau,\sigma_i)\,\mathrm{d}\tau \cdot \prod_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n}\left(1-\int_0^{t_1+\Delta t} f_j(\tau,\sigma_j)\,\mathrm{d}\tau\right) + \int_{t_1}^{t_2} f_i(\tau,\sigma_i)\,\mathrm{d}\tau \cdot \\ & \prod_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n}\left(1-\int_{t_1}^{t_2+\Delta t} f_j(\tau,\sigma_j)\,\mathrm{d}\tau\right) + \cdots + \\ & \int_{t_m}^{t} f_i(\tau,\sigma_i)\,\mathrm{d}\tau \cdot \prod_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n}\left(1-\int_{t_m}^{t+\Delta t} f_j(\tau,\sigma_j)\,\mathrm{d}\tau\right) \end{aligned} \tag{5}$$

其中 $m$ 表示将 $t$ 划分为 $m$ 段. 则 $0\sim t+\Delta t$ 的寿命期内,该结构只有一个细节产生裂纹而其它细节不产生裂纹的概率为

$$P_1=\sum_{i=1}^{n}\left[\int_0^t f_i(\tau,\sigma_i)\,\mathrm{d}\tau\cdot\prod_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}\left(1-\int_0^{t+\Delta t}f_j(\tau,\sigma_j)\,\mathrm{d}\tau\right)\right]=\sum_{i=1}^{n}\left[\int_0^t f_i(\tau,\sigma_i)\cdot\prod_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}\left(1-\int_0^{t+\Delta t}f_j(\tau,\sigma_j)\,\mathrm{d}\tau\right)\mathrm{d}\tau\right]\tag{6}$$

在 $0\sim t+\Delta t$ 的寿命期内,当 2 个或多于 2 个细节萌生裂纹时,可以认为发生了 MSD,式(7)给出了 $0\sim t+\Delta t$ 的寿命期内,计算多细节构件发生 MSD 的可能性.

$$P_{\mathrm{MSD}}=1-P_{\mathrm{D0}}-P_{\mathrm{D1}}\tag{7}$$

此处 $\Delta t$ 的确定方法为:一个细节出现裂纹后,该裂纹扩展到其长度影响其它的细节,尤其是临近和靠近边界的细节,使得这些细节中的应力增幅达到 $\gamma$ 时,或者该裂纹长度时的应力强度因子达到或超过材料的断裂韧度,则认为此时该裂纹达到其允许的极限长度. 该裂纹的这一扩展时间即为 $\Delta t$,相应的载荷循环数定义为 $\Delta N$.

如果这些细节相互独立,且承受的应力差异很小,那么可认为这些细节承受相同大小的应力水平. 则到 $t$ 时刻,其中任一个细节裂纹萌生的概率为

$$p=\int_0^t f(\tau,\sigma)\,\mathrm{d}\tau\tag{8}$$

则到 $t$ 时刻所有细节出现裂纹的概率为 $p^n$. $0\sim t+\Delta t$ 的寿命期内单个细节不出现裂纹的概率为

$$p'=1-\int_0^{t+\Delta t}f(\tau,\sigma)\,\mathrm{d}\tau\tag{9}$$

则 $0\sim t+\Delta t$ 的寿命期内,该结构不出现裂纹的概率为

$$P_{\mathrm{S0}}=(1-p')^n=\left(1-\int_0^{t+\Delta t}f(\tau,\sigma)\,\mathrm{d}\tau\right)^n\tag{10}$$

从 $0\sim t+\Delta t$ 的寿命期内,只有一个细节出现裂纹,其它细节不出现裂纹的概率为

$$P_{\mathrm{S1}}=n\cdot\int_0^t f(\tau,\sigma)\,\mathrm{d}\tau\cdot\left(1-\int_0^{t+\Delta t}f(\tau,\sigma)\,\mathrm{d}\tau\right)^{n-1}\tag{11}$$

而对于相同应力水平时,多细节结构发生 MSD 的概率为

$$P_{\mathrm{MSD}}=1-P_{\mathrm{S0}}-P_{\mathrm{S1}}\tag{12}$$

相应的概率密度及其分布参数都可以通过已有的试验资料获得.

## 4　分析实例

利用上述计算方法,可以利用已有单细节的试验数据计算出到某一寿命期内含多细节构件产生 MSD 的概率. 下面给出一个具体的计算实例.

### 4.1　单细节试验结果

单细节试验件材料为 2024-T3$\delta$2. 0 板材. 试件形式如图 5 所示. 该试件的几何尺寸见表 1,材料的静力性能见表 2.

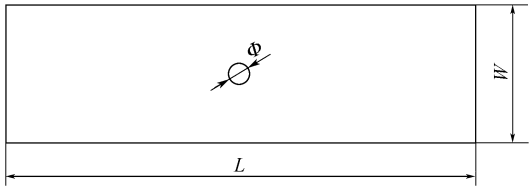



图 5　单细节试件图

**表 1　试件几何尺寸**

| $L$/mm | $W$/mm | 厚度 $\delta$/mm | 中心孔直径 $\Phi$/mm | 应力集中系数 $K_t$ |
|---|---|---|---|---|
| 180 | 40 | 2 | 6 | 3 |

**表 2　静力性能**

| $E$/Gpa | $\sigma_{p0.2}$/MPa | $\sigma_b$/MPa | $\delta_5$/% |
|---|---|---|---|
| 68 | 342 | 458 | 17. 1 |

单细节的疲劳试验均在 MTS880-100KN 试验机上进行,每一应力水平下试验的试件数为 7 ~ 8 件,共进行 4 个不同应力水平下的试验. 其试验结果见表 3.

**表 3　单细节的试验结果**

| 序号 | 应力水平 $S$/MPa | 对数疲劳寿命均值 $\mu$ | 对数疲劳寿命标准差 $\sigma$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 152. 6 | 4. 970 | 0. 033 |
| 2 | 141. 4 | 5. 004 | 0. 040 |
| 3 | 135. 8 | 5. 064 | 0. 057 |
| 4 | 130. 2 | 5. 144 | 0. 072 |

将 $S$ 取对数,与 $\mu$ 拟合,其公式为

$$\mu=10.290-2.445\lg S\tag{13}$$

将 $S$ 取对数,与 $\sigma$ 拟合,其公式为

$$\sigma=1.259-0.563\lg S\tag{14}$$

### 4.2　裂纹扩展分析

在本文中,假定一旦出现裂纹,则裂纹长度为 1 mm,即 $\Delta t$ 为裂纹从 1 mm 扩展到其允许长度的裂纹扩展时间,$\Delta N$ 为其扩展循环数. 取 $\gamma=5\%$,即裂纹扩展使得其它细节中的应力增幅达到 5%.

7 种应力水平下计算 $\Delta N$,如表 4 所列.

表4 不同应力水平下的 $\Delta N$

| 序号 | $S$/MPa | $\Delta N$ |
|---|---|---|
| 1 | 152.6 | 1526 |
| 2 | 147.0 | 2089 |
| 3 | 141.4 | 2774 |
| 4 | 138.6 | 3115 |
| 5 | 135.8 | 3617 |
| 6 | 133.0 | 4079 |
| 7 | 130.2 | 4626 |

### 4.3 MSD 发生概率的计算

如图6的多细节结构,该结构上有5个光孔(或细节). 单细节在不同应力水平下的裂纹萌生寿命服从对数正态分布,其分布参数可以通过已有的试验资料获得,具体数值见表3. 假设该试件中各个细节相互独立,利用上述的方法可以计算出到 $N=80\,000$ 寿命周期时,该试件发生 MSD 损伤的概率. 图7给出了计算的该多细节试件在不同应力水平下产生 MSD 的概率.

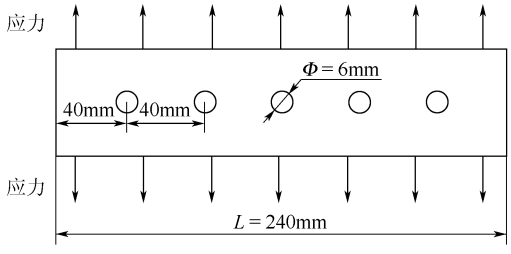



图6 多细节结构示意图

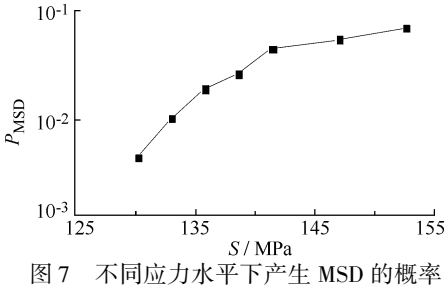



图7 不同应力水平下产生 MSD 的概率

## 5 结束语

本文基于疲劳统计学的基础,提出了一种定量方法来计算产生 MSD 的概率,并给出相应的理论推导和算例. 计算结果表明随着应力水平的提高,产生 MSD 的概率也随之增大. 本文通过建立多细节结构失效与单细节结构失效之间的关系,能方便地计算出 MSD 产生的概率. 但是,计算结果的准确性仍需要进一步试验验证.

### 参考文献(References)

[1] Shi P, Mahadevan S. Corrosion fatigue and multiple site damage reliability analysis[J]. Int J Fatigue, 2003, 25(6): 457-469

[2] Cherry M C, Mall S, Heinimann B. Residual strength of unstiffened aluminum panels with multiple site damage[J]. Eng Fract Mech, 1997, 57(6): 701-713

[3] Pieracci A, Mengali G. An assessment of multiple site damage through a simple statistical model[R]. AIAA Paper 1999-1437, 1999

[4] Pidaparti R M V, Palakal M J, Rahman Z A. Simulation of structural integrity predictions for panels with multiple site damage [J]. Adv Eng Software, 2000, 31(2): 127-135

[5] Wang G S. Analysing the onset of multiple site damage at mechanical joints[J]. Int J Fract, 2000, 105(3): 209-241

[6] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京:国防工业出版社, 1986
Gao Zhentong. Fatigue applied statistics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1986 (in Chinese)

[7] 刘文珽,郑旻仲,费斌军. 概率断裂力学与损伤容限/耐久性分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1999
Liu Wenting, Zheng Minzhong, Fei Binjun, et al. Probability fracture mechanics and damage tolerance/durability analysis [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1999 (in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)