

文章编号: 1000-6893(2006)03-0459-04

# 腐蚀结构分析中腐蚀坑的随机布置和计算机模拟

任克亮<sup>1,2</sup>, 吕国志<sup>1</sup>, 张有宏<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

(2. 宁夏大学 物理与电气信息学院, 宁夏 银川 750021)

## Stochastic Arrange and Computer Simulation of Corrosion Pitting in Damage Structure

REN Ke liang<sup>1,2</sup>, LU Guo zhi<sup>1</sup>, ZHANG You hong<sup>1</sup>

(1. Department of Aircraft Engineering, Northw est ern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Department of Physics & Electrical Information Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**摘要:** 针对老龄化飞机安全评估分析中结构表面存在广布随机不等直径腐蚀坑这一现状, 采用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法分析并编制了计算机程序, 完成了由结构腐蚀原况到计算模型的映射, 从而实现了利用计算机模拟再现结构腐蚀损伤, 为定量研究腐蚀损伤对老龄飞机结构的剩余强度和寿命影响提供可能。

**关键词:** 老龄飞机; 腐蚀坑; 统计分析; 蒙特卡罗; 混沌映射; 计算机模拟; 剩余强度

**中图分类号:** V215.2; O346.23 **文献标识码:** A

**Abstract:** In safety evaluation analysis of aged aircraft in corrosive environment, there are many widespread stochastic corrosion pits with different radii on structural surface. The ideal program, using Monte Carlo method, is compiled which is used to map the pitted structure to calculation model. The method can visualize the simulation of eroded status and provide a platform for computing the residual strength and life of the damaged structure with corrosion pits.

**Key words:** aging aircraft; pitting; statistical analysis; Monte Carlo; chaotic mapping; computerized simulation; residual strength

腐蚀是飞机结构的一种主要损伤形式, 它不仅使结构的强度及刚度降低, 甚至影响飞机的飞行安全而造成飞行故障和灾难。例如<sup>[1]</sup>: 1981年, 台湾一架波音 747 客机因机身下部结构腐蚀、蒙皮变薄, 产生孔洞和裂纹, 在压力作用下导致在空中解体。还有 1988 年美国 Aloha 航空公司的波音 737 的空中事故。这些事故的发生引起了人们对受腐蚀损伤影响老龄飞机飞行安全的极大关注。其中以美国为首的发达国家投入了大量人力和物力开展了这方面研究, 并取得一定的成果。中国由于技术和资金方面的不足, 在这方面的研究还处于起步阶段。中国的军机, 由于处在潮湿、高温的腐蚀环境中, 一部分已经进入了老龄化, 所以开展腐蚀环境下老龄飞机安全寿命的研究具有重大的社会和经济效益, 通过现场调研发现在老龄飞机结构上, 主要存在剥蚀和坑蚀两种腐蚀形式; 其中坑蚀一般表现为由金属表面并向厚度方向深入发展的一种局部破坏形式, 这种腐蚀危害性大, 部位一般难于预测, 易形成腐蚀疲劳裂纹源, 成为降低飞机结构强度的一个主要因素, 从而

也成为腐蚀结构分析中热点<sup>[2]</sup>。在对腐蚀环境下的老龄飞机进行常规检测时发现, 结构面上存在大量随机分布的腐蚀坑, 不论从位置上还是空间尺寸上一般都无序可寻, 这样对受坑蚀损伤结构进行可靠性分析时腐蚀坑位置的确定对计算结果有很大的影响。以往分析中通常采用人工办法把腐蚀坑取为排列有序的分布形式, 这种处理往往会给计算结果带来一定的误差。为了弥补以上不足, 本文采用 Monte Carlo 数值模拟方法, 先对腐蚀结构进行腐蚀坑的原位观测并进行统计分析<sup>[3]</sup>, 得到服从 Weibull 分布的腐蚀坑深度对应的分布函数, 然后根据该函数进行随机抽样并确定各个腐蚀坑中心的位置, 最后通过施加边界条件和各个坑之间的交叉限制, 初步实现了由结构腐蚀原况到计算模型的映射, 为定量研究腐蚀损伤对老龄飞机结构的剩余强度和寿命影响提供可能。

### 1 用 Monte Carlo 方法实现结构中腐蚀坑到数学模型的映射

(1) 腐蚀坑的测量与统计分析 为了掌握老龄飞机的腐蚀状况, 通过现场对海军某歼击机进行取样, 得到该机前梁缘条上局部腐蚀照片如图 1 和所有腐蚀坑的空间尺寸如表 1 所示, 然后通



图 1 前梁边缘上局部腐蚀图

Fig 1 The picture of corrosion in edge of stringer

表 1 腐蚀坑的序号和深度

Table 1 The number and depth of pit

序号	d/mm	序号	d/mm	序号	d/mm
1	0.9	28	1.9	55	0.5
2	0.7	29	1.6	56	1.7
3	1.8	30	0.8	57	0.9
4	0.7	31	1.5	58	1.2
5	2.0	32	1.3	59	1.4
6	1.3	33	1.8	60	1.3
7	2.3	34	1.9	61	0.6
8	1.1	35	0.4	62	0.8
9	1.2	36	0.6	63	1.5
10	1.6	37	1.1	64	1.0
11	1.6	38	1.2	65	1.0
12	0.8	39	1.7	66	0.9
13	1.3	40	1.5	67	1.9
14	1.8	41	1.2	68	1.6
15	0.9	42	0.6	69	1.4
16	1.7	43	1.4	70	1.4
17	0.7	44	0.3	71	1.1
18	1.5	45	2.2	72	1.2
19	2.4	46	0.8	73	0.3
20	1.3	47	2.0	74	1.7
21	2.2	48	1.3	75	1.8
22	0.3	49	2.1	76	1.7
23	0.9	50	1.0	77	1.5
24	2.1	51	2.1	78	0.4
25	0.8	52	0.7	79	1.6
26	0.4	53	1.8	80	0.5
27	0.5	54	0.6		

过数理统计软件 SPSS 对观测数据进行统计检验得图 2, 结果发现腐蚀坑深度服从威布尔 (Weibull) 分布, 而威布尔分布所对应的双参数分布函数和概率密度函数分别为式(1)和式(2), 其中  $\beta$  是表征位置的参数;  $\alpha$  是形状参数, 结合 SPSS 软件内的  $P-P$  图可以直接确定  $\beta$  和  $\alpha$  的值分别为 1.432 和 2.319, 把  $\beta$  和  $\alpha$  的值代入式(1), 得到腐蚀坑深度对应的分布函数式(3)。最后将表 1 中的观测数据按照腐蚀坑深度从小到大重新排列, 并和式(3)一同代到作图软件 Origin 内, 得到图 3 所示的曲线图, 通过比较发现二者较为接近, 所以用 Weibull 函数作为腐蚀坑深度的分布函数是合适的。

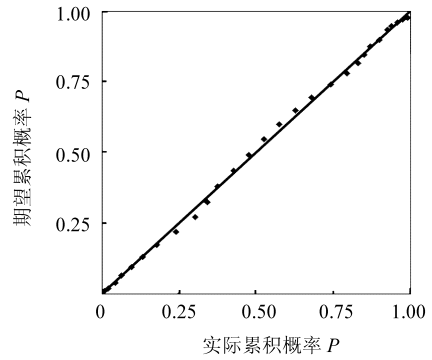
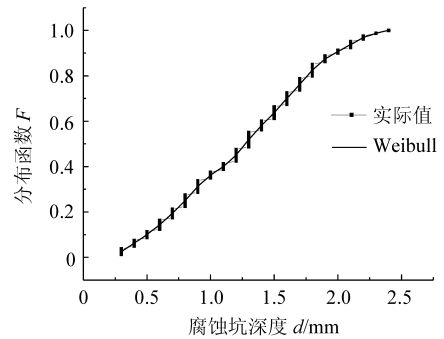
图 2 腐蚀坑深度对应 Weibull 分布的  $P-P$  图Fig 2 The Weibull  $P-P$  Plot of pitting depth

图 3 腐蚀坑深度的累计分布函数

Fig 3 Accumulative distribution function of pitting depth

$$F_X(r) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{r}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad r \geq 0 \quad (1)$$

$$f_X(r) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{r}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{r}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad r \geq 0 \quad (2)$$

$$F_X(r) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{r}{1.432}\right)^{2.319}\right] \quad r \geq 0 \quad (3)$$

(2) 随机数的产生 用 Monte Carlo 方法求解问题时, 基本工具是一组随机数。产生随机数是 Monte Carlo 方法的基础, 目前常用的方法有线性同余法, 非线性同余法, Fibonacci, Trustworthy 序列和基于混沌映射产生随机数的方法等; 但由于在混沌映射 (chaotic mapping) 产生随机数的过程中, 使用如下递推公式

$$y_{i+1} = \begin{cases} (3/2)y_i + 1/4 & \text{若 } 0 \leq y_i < 1/2 \\ (1/2)y_i - 1/4 & \text{若 } 1/2 \leq y_i < 1 \end{cases} \quad (4)$$

并指出此递推式可以产生周期为无序的序列, 其经验分布的极限分布为

$$F(y) = [\ln(y + 1/2) + \ln 2] / \ln 3 \quad (5)$$

根据产生随机数中的概率理论, 若随机变量  $\eta$  的分布函数为  $F(y)$ , 则  $\xi = F(\eta)$  有  $(0, 1)$  分布, 于是由

$$x_i = \ln(y_i + 1/2) / \ln 3 \quad (6)$$

得到的序列  $\{x_i\}$  可看作是有  $U(0, 1)$  分布的随机

序列。因为随机序列  $\{y_i\}$  是无限不循环的, 所以以上方法可产生周期为无限的  $U(0, 1)$  分布序列, 而被广泛应用, 本文通过以上递推公式并结合计算语言得到了随机数列  $\xi_i$ 。

(3) 腐蚀坑序列随机抽样 通过以上统计发现腐蚀坑深度服从 Weibull 函数  $F_X(r)$  分布, 这样就可以按函数  $F_X(r)$  对腐蚀坑序列  $X_n$  进行随机抽样, 其一般取形式为

$$X_n = F_r^{-1}(\xi_n) \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

或简化为

$$X_F = F_r^{-1}(\xi) \quad (8)$$

其中:  $r$  表示腐蚀坑深度;  $\xi$  表示随机数序列。通过以上算法实现了腐蚀坑的抽样, 其结果如表 2 所示。

表 2 随机抽样中各个坑的序号、半径和位置坐标

Table 2 The number, radius  $R$  and the location  $X$  and  $Y$  of pit in random sampling

序 号	$R$ /mm	$X$ /mm	$Y$ /mm	序 号	$R$ /mm	$X$ /mm	$Y$ /mm
1	1.6	329.0	-3.8	41	1.6	-136.0	-18.2
2	1.7	1273.6	4.3	42	1.3	1674.0	9.0
3	1.2	-303.1	14.0	43	1.9	541.7	-30.0
4	0.9	-449.8	22.7	44	0.5	-960.5	13.9
5	1.2	-556.2	-11.3	45	0.8	-29.8	-4.1
6	1.3	-1961.2	-18.4	46	0.8	-249.2	-10.2
7	1.5	-1359.1	16.8	47	1.8	-1719.4	20.5
8	0.4	-221.6	25.4	48	1.7	1024.8	13.9
9	1.7	22.0	0.8	49	2.1	1533.6	26.2
10	2.0	-1207.6	20.5	50	1.3	1201.0	14.3
11	2.1	1848.0	-29.7	51	1.7	1160.5	-13.8
12	1.1	1598.8	-12.1	52	0.7	1081.2	-23.4
13	1.8	975.8	-27.4	53	1.3	1307.9	0.3
14	0.5	984.0	29.8	54	0.5	1564.0	-19.6
15	0.7	647.6	21.0	55	2.2	-1507.1	2.3
16	1.4	1088.9	7.1	56	0.7	1110.3	-9.7
17	0.6	1918.0	-17.6	57	1.9	945.4	27.3
18	1.3	-751.1	30.3	58	1.8	1243.5	-13.5
19	1.3	-784.7	-0.3	59	0.5	357.4	11.8
20	0.7	-826.0	2.0	60	1.8	49.6	-7.4
21	1.1	-405.0	-6.7	61	0.9	-847.3	-7.4
22	1.7	768.7	-20.3	62	2.2	1676.9	-22.1
23	0.9	-1387.6	20.0	63	0.3	1966.7	16.3
24	2.1	1611.9	-9.7	64	0.9	1836.5	20.4
25	1.5	-427.8	2.0	65	0.7	-424.8	-17.3
26	1.9	-1779.0	-24.5	66	1.8	1301.7	-28.8
27	0.6	1038.6	7.1	67	1.9	-354.7	17.9
28	2.2	-428.1	16.1	68	0.9	-579.5	-11.2
29	0.5	549.3	22.7	69	1.4	-1076.5	-13.4
30	2.1	819.1	4.7	70	0.7	-434.6	13.5
31	1.9	1791.4	1.4	71	2.1	-1598.1	5.6
32	1.3	775.6	25.3	72	1.3	-1288.7	0.4
33	0.8	-1633.4	23.2	73	0.7	-1114.99	-30.5
34	1.1	-791.3	12.0	74	2.0	875.5	-18.4
35	1.5	1001.1	15.2	75	1.9	485.5	-17.3
36	0.6	-1639.6	13.2	76	0.5	-1337.8	27.5
37	1.7	1515.7	-17.5	77	0.8	-1852.4	-18.2
38	2.2	635.1	-29.5	78	0.6	-1298.4	29.4
39	1.7	-103.6	4.7	79	1.3	1097.6	-20.1
40	1.5	-1880.1	31.2	80	0.8	-789.3	0.8

(4) 腐蚀坑位置的确定 在腐蚀结构分析中, 通常将不规则的坑等效为半球面或半椭圆面<sup>[4]</sup>, 分析验证表明, 采用两种等效形式其结果区别不大<sup>[5]</sup>, 本文为了简化起见取半球面的等效形式。在空间结构中要完整表征一个腐蚀坑需要 4 个参量, 即腐蚀坑中心位置的坐标  $(x_i, y_i, z_i)$  和半径  $r_i$ , 由于各个坑的中心位置在同一个平面上, 这样  $z_i$  保持不变,  $r_i$  由对应腐蚀坑的深度确定, 而对  $x_i$  和  $y_i$  可由下式确定

$$\left. \begin{aligned} x_i &= a(2\xi_i - 1)/2 \\ y_i &= b(2\eta_i - 1)/2 \end{aligned} \right\} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中:  $a$  表示结构的长;  $b$  表示结构的宽;  $\xi$  和  $\eta$  表示两组随机数。为了避免出现腐蚀坑超出边界和两两腐蚀坑之间相交的现象, 可采用以下办法来完成<sup>[6]</sup>

① 边界限制检查

$$\left. \begin{aligned} -a/2 + r_i &\leq x_i \leq a/2 + r_i \\ -b/2 + r_i &\leq y_i \leq b/2 + r_i \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

② 交叉限制检查

$$d(s_i, s_j) \geq r_i + r_j, \quad 1 \leq i, j \leq 80, \quad i \neq j \quad (11)$$

$$d(s_i, s_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (12)$$

其中:  $d(s_i, s_j)$  表示任意两个腐蚀坑间的距离, 对应的  $r_i$  和  $r_j$  表示这 2 个腐蚀坑的半径。在程序中实现以上 2 个限制检查时, 采用循环判断语句, 如不满足式(10)或式(11)条件, 可以采用如下形式加以修正

$$x(i) = x(i) - \delta_x(i) / |x(i)| \quad (13)$$

$$y(i) = y(i) - \delta_y(i) / |y(i)| \quad (14)$$

在式(11)中, 两任意腐蚀坑中心间的距离  $d(s_i, s_j)$  的计算是一个组合问题, 采用以下语句过程来完成

```
do i = 1, N, 1
do j = (i + 1), N, 1
dij = (((i - 1) * (2 * N - i)) / 2) + j - i =
SQRT((x(i) - x(j)) * (x(i) - x(j)) +
(y(i) - y(j)) * (y(i) - y(j)))
enddo
enddo
```

$x(i)$  和  $y(i)$  是腐蚀坑位置的数组元素,  $|x(i)|$  和  $|y(i)|$  表示位置坐标的模, 主要用来确定增减方向, 保证在边界检查中始终向着结构面内部移动,  $\delta$  表示增量, 其大小一般不是常数, 根据腐蚀坑与边界或两个腐蚀坑之间来决定, 如在式(9)中, 一般

取  $\delta$  的值为  $|d(s_i, s_j) - (r_i + r_j)|$ 。最后得到各个坑在数学模型中的位置和对应的半径值,其结果如表 2。

(5) 腐蚀坑的计算机模拟 通过以上过程先对观测数据进行统计分析后,得到其服从 Weibull 分布的分布函数,再以该函数为基础并结合随机数序列对腐蚀坑进行了随机抽样,然后通过边界条件和两两腐蚀坑之间的相交限制成功的确定了各腐蚀坑中心位置,从而初步实现了老龄飞机结构中原腐蚀损伤状态到计算模型上的映射。为了进一步对腐蚀损伤结构进行可靠性分析,本文将编制的 FORTRAN 程序和仿真分析软件 ANSYS 联系起来,充分利用 ANSYS 软件的分析功能,最后将计算结果传递到 ANSYS 软件的前处理器内成功模拟了腐蚀坑在结构板上的随机分布图,如图 4 所示。

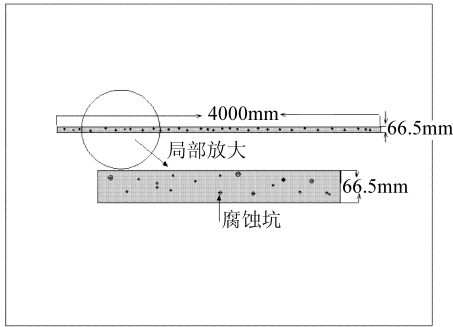


图 4 腐蚀坑在计算模型上的分布

Fig 4 The distribution of pits on computing model

## 2 结 论

通过 Monte Carlo 方法初步实现了从腐蚀损伤结构上随机腐蚀坑到数值模型上的映射,克服了长期以来在对腐蚀结构的分析中由于对腐蚀坑的近似处理而对结果带来的误差,为定量研究腐蚀损伤对老龄飞机结构的剩余强度和寿命影响提

供可能。

## 参 考 文 献

- [1] 童谷生,李友和,孙良新.飞机老化研究进展综述[J].华东交通大学学报,2002,19(2): 34-38.  
Tong G S, Li Y H, Sun L X. A review on aging aircraft research [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2002, 19(2): 34-38. (in Chinese)
- [2] 周向阳,柯伟.点蚀坑的形貌与腐蚀疲劳裂纹萌生[J].金属学报 1992,28(8):356-360.  
Zhou X Y, Ke W. Macro and micromorphologies of pits and initiation of corrosion fatigue crack[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1992, 28(8): 356-360. (in Chinese)
- [3] 陈跃良,吕国志,段成美.服役条件下飞机结构腐蚀损伤概率模型研究[J].航空学报,2002,23(3):249-251.  
Chen Y L, Lu G Z, Duan C M. A probability model for the corrosion damage of aircraft structure in service environment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(3): 249-251. (in Chinese)
- [4] Dolley E J, Lee B, Wei R P. The effect of pitting corrosion of fatigue life[J]. Fatigue Frac Eng Mater Struct, 2000, 23(7): 555-600.
- [5] DuQuesnay D L, Underhill P R, Britt H J. Fatigue crack growth from corrosion damage in 7075 T6511 aluminum alloy under aircraft loading [J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 371-377.
- [6] 裴鹿成.计算机随机模拟[M].长沙:湖南科学技术出版社,1989.124-163.  
Pei L C. Computer stochastic simulation [M]. Changshan: Hunan Science Press, 1989. 124-163. (in Chinese)

作者简介:



任克亮(1971-) 男,回族,宁夏西吉人,西北工业大学在读博士生,宁夏大学物理与电气信息学院副教授,主要研究方向为:固体力学中的数值计算与仿真分析。E mail: kl\_ren@nxu.edu.cn, 联系电话:0951 2080877

(责任编辑:李铁柏)