

# 预腐蚀裂纹萌生寿命影响系数模型研究

王刚, 金平, 谭晓明

(海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041)

**摘要:** 在腐蚀环境下飞机结构耐久性分析的相对小裂纹范围内, 研究了不同指定裂纹尺寸对应的裂纹萌生寿命预腐蚀影响系数模型。对比分析了4种函数形式对 $(C, t)$ 数据的拟合, 结果表明单参数指数函数形式拟合效果最好, 不同裂纹尺寸的 $C-t$ 曲线参数无显著差异。

**关键词:** 预腐蚀; 裂纹萌生寿命; 影响系数;  $C-t$ 曲线

**中图分类号:** V216.3      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2011)04-0016-04

## Research on Models of Influence Coefficient of Pre-corrosion Crack Initiation Life

WANG Gang, JIN Ping, TAN Xiao-ming

(Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** Within the range of small crack during analysis of aircraft structural durability under corrosion environment, the model of pre-corrosion crack initiation life influence coefficient at different crack sizes was studied. The data of  $(C, t)$  was fitted with four forms of function, and then the fitting results were compared and analyzed. The result showed that the single parameter exponent form of the function is the best and the slopes of these curves have no difference.

**Key words:** pre-corrosion; crack initiation life; influence coefficient;  $C-t$  curve

飞机结构的耐久性分析是通过对裂纹萌生阶段进行研究来预测结构的经济寿命并确定结构是否大修<sup>[1]</sup>。腐蚀环境下结构耐久性分析需要研究指定裂纹尺寸下裂纹萌生寿命的变化规律, 得到不同裂纹尺寸对应的裂纹萌生寿命预腐蚀影响 $C-t$ 曲线。研究表明 $C-t$ 曲线与裂纹尺寸基本无关<sup>[2-3]</sup>, 由于不同的 $C-t$ 曲线形式拟合效果存在一定的差异, 笔者对比分析了不同的 $C-t$ 曲线形式对指定裂纹尺寸对应的裂纹萌生寿命预腐蚀影响系数 $C$ 的影响, 从而得到最佳的 $C-t$ 曲线形式。

## 1 预腐蚀裂纹萌生寿命影响系数的一般统计形式

### 1.1 基本假设

一般环境和预腐蚀条件下飞机结构疲劳寿命的分布形式已被大量地研究, 有如下结论:

1) 一般环境下, 对同一应力水平进行疲劳试验时, 在中、短寿命区, 对数疲劳寿命遵循正态分布<sup>[4,7]</sup>;

收稿日期: 2011-01-12

作者简介: 王刚(1982—), 男, 河北泊头人, 硕士研究生, 主要研究方向为飞机结构寿命评定技术。

2) 预腐蚀时间  $t$  后,一般环境下结构疲劳寿命服从对数正态分布<sup>[2,5-7]</sup>。

## 1.2 预腐蚀影响系数的统计形式

由上面的假设可知,在同一应力水平下预腐蚀  $0, t$  后,一般环境下给定裂纹尺寸的裂纹萌生寿命为相互独立的随机变量  $N_0, N_t$ , 且  $\ln N_0 \sim N(\mu_0, \sigma_0^2)$ , 令  $x = \ln N_0, y = \ln N_t$ , 则指定裂纹尺寸下对数裂纹萌生寿命和裂纹萌生寿命的概率密度函数分别为  $g_0(x), g_t(y), f_0(N_0), f_t(N_t)$ 。

$$g_0(x) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] \quad (0 < x < \infty) \quad (1)$$

$$f_0(N_0) = \frac{1}{N_0 \sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln N_0 - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] \quad (0 < x < \infty) \quad (2)$$

式中:  $\mu_0, \sigma_0$  分别为指定裂纹尺寸下的对数裂纹萌生寿命的母体平均值和标准差。根据式(2)给出的概率密度函数,可求得  $N_0$  的母体平均值  $\mu_{N_0}$ :

$$\begin{aligned} \mu_{N_0} &= E(N_0) = \int_0^{\infty} N_0 f_0(N_0) dN_0 = \\ &= \int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln N_0 - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] dN_0 = \\ &= \exp\left(\frac{1}{2}\sigma_0^2 + \mu_0\right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{同理可求出: } \mu_{N_t} = \exp\left(\frac{1}{2}\sigma_t^2 + \mu_t\right) \quad (4)$$

指定裂纹尺寸下预腐蚀裂纹萌生寿命影响系数的统计表达式:

$$C = \frac{\mu_{N_t}}{\mu_{N_0}} = \frac{\exp\left(\frac{1}{2}\sigma_t^2 + \mu_t\right)}{\exp\left(\frac{1}{2}\sigma_0^2 + \mu_0\right)} = \exp\left[\frac{1}{2}(\sigma_t^2 - \sigma_0^2) + (\mu_t - \mu_0)\right] \quad (5)$$

## 2 C-t 曲线形式

研究表明,以下4种函数形式<sup>[3,6-7]</sup>拟合的  $C-t$  曲线具有较高的精确度,假设给定裂纹尺寸对应的裂纹萌生寿命预腐蚀影响系数  $C$  也符合这4种曲线形式,通过对比研究从而择优确定  $C-t$  曲线形式。4种

拟合  $C-t$  曲线的函数形式分别如下。

$$1) \text{ 幂函数式: } C(t) = 1.0 - \alpha t^\beta。$$

幂函数式物理意义不够明确,但现有的试验数据表明,该式局部拟合效果很好,在工程常用的时间范围内拟合精度较高,应用广泛<sup>[3,6-7]</sup>。

$$2) \text{ 双参数指数函数式: } C(t) = 1.0 - \exp(-\alpha t^\beta)。$$

$$3) \text{ 双参数指数函数式: } C(t) = \exp(\alpha t^\beta)。$$

上述2种双参数指数函数,物理意义比较明确,拟合效果好<sup>[3,6-7]</sup>。

$$4) \text{ 单参数指数函数式: } C(t) = \exp(\beta t)。$$

该式很容易转化为线性函数,回归分析比较容易,并且对试验数据无特殊要求,现有试验数据表明,该式拟合效果很好<sup>[3,6]</sup>。

## 3 C-t 曲线形式对比分析

### 3.1 裂纹萌生寿命数据

采用歼  $\times$  型飞机机翼后梁加速预腐蚀不同时间后,一般环境下谱载荷裂纹扩展寿命数据详见文献[2]附表2。取  $\sigma = 312.9$  MPa 对应的裂纹扩展数据,由 Matlab 三次样条插值计算裂纹尺寸  $a$  为 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mm 时对应的裂纹萌生寿命,  $(a, N)$  数据见表1,根据式(5)可求得预腐蚀影响系数  $C$ , 计算结果见表1。

在给定显著水平  $\alpha = 0.05$  时,进行  $F$  检验,上述不同的指定裂纹尺寸对应的对数裂纹萌生寿命具有方差其次性:综合标准差  $s_w = 0.2228$ 。

### 3.2 (C, t) 数据的线性回归分析

利用最小二乘法对不同裂纹尺寸对应的  $(C, t)$  数据进行拟合,分别对4种函数形式进行拟合检验,拟合得到的线性方程的参数见表2。

从拟合结果来看,通过相关系数检验,各函数形式的拟合结果都具有良好的线性趋势,且相关系数差别不大。由指定裂纹尺寸的剩余方差可知幂函数形式和双参数指数函数形式在给定裂纹尺寸为 0.8, 1.0 mm 的拟合的精度比其它2种函数形式稍差一些,但总体来说,4种函数形式拟合的相关性均较高。

### 3.3 曲线斜率差异性检验

如果  $C-t$  曲线参数经检验无差异,则说明  $C-t$  曲线具有通用性<sup>[2]</sup>。检验  $C-t$  曲线斜率是否有显著

表1 给定裂纹尺寸的裂纹萌生寿命及数据处理结果

Table 1 The crack initiation life of the designated crack size and the results of data processing

裂纹尺寸 $a/mm$	$t/d$	裂纹萌生寿命 $N/h$					$\mu$	$\sigma$	$C$
		1号试件	2号试件	3号试件	4号试件	5号试件			
0.4	0	4 967.1	6 662.1	4 788.4	5 913.8	—	8.618 4	0.154 3	1.000 0
	3	5 471.3	4 352.4	3 244.3	5 142.8	—	8.403 9	0.233 8	0.819 5
	6	2 678.4	4 890.0	3 966.0	2 722.8	—	8.145 7	0.295 1	0.643 4
	9.5	1 978.5	2 711.9	2 008.8	3 655.7	3 054.3	7.865 8	0.266 9	0.482 4
0.6	0	5 442.9	7 244.4	5 008.0	6 438.8	—	8.694 7	0.165 9	1.000 0
	3	5 967.0	4 909.8	3 682.8	5 629.0	—	8.510 0	0.215 2	0.839 2
	6	3 111.2	5 340.3	4 410.3	3 128.6	—	8.266 5	0.266 8	0.666 1
	9.5	2 264.6	3 045.9	2 529.9	4 071.2	3 413.4	8.006 0	0.233 6	0.509 1
0.8	0	5 853.6	7 680.5	5 396.4	6 927.7	—	8.764 5	0.159 8	1.000 0
	3	6 789.7	5 336.8	4 017.6	6 026.4	—	8.602 0	0.225 0	0.860 7
	6	3 470.0	5 619.6	4 751.2	3 487.7	—	8.352 3	0.238 5	0.672 7
	9.5	2 517.3	3 348.0	2 664.6	4 328.9	3 711.1	8.085 4	0.226 6	0.513 7
1.0	0	6 213.2	8 072.8	5 720.1	7 291.5	—	8.819 2	0.155 2	1.000 0
	3	7 500.0	5 708.4	4 549.7	6 377.4	—	8.688 9	0.209 8	0.886 6
	6	3 785.7	5 987.9	5 050.2	3 798.8	—	8.426 5	0.225 5	0.684 3
	9.5	2 744.2	3 592.7	2 680.5	4 573.3	3 980.1	8.142 9	0.233 2	0.516 3

表2  $(C,t)$ 数据的线性回归参数

Table 2 The linear regression parameter of the  $(C,t)$  data

函数形式	回归参数	裂纹尺寸 $a/mm$			
		0.4	0.6	0.8	1.0
$C(t)=1.0-\alpha t^\beta$	$\alpha$	-2.709 7	-2.787 8	-2.845 4	-2.927 8
	$\beta$	0.919 4	0.975 1	1.096 4	1.275 9
	$r$	0.998 7	0.998 2	0.995 8	0.993 2
	$\sigma_e^2$	0.000 74	0.014 85	0.141 54	0.567 62
	$l_{xx}$	0.673 43			
$C(t)=1.0-\exp(-\alpha t^\beta)$	$\alpha$	1.457 4	1.525 5	1.561 1	1.607 3
	$\beta$	-0.821 0	-0.811 8	-0.868 3	-0.949 4
	$r$	-0.996 7	0.997 6	-0.999 1	0.999 7
	$\sigma_e^2$	0.001 50	0.001 43	0.010 30	0.0728 5
	$l_{xx}$	0.673 43			
$C(t)=\exp(\beta t)$	$\beta$	-0.075 2	-0.069 3	-0.067 7	-0.065 9
	$r$	-0.999 3	-0.998 9	-0.997 2	0.993 7
	$\sigma_e^2$	0.001 72	0.000 72	0.001 72	0.003 73
	$l_{xx}$	270.5			
$C(t)=\exp(\alpha t^\beta)$	$\alpha$	-2.849 3	-2.9445	-3.009 1	-3.009 8
	$\beta$	1.127 8	1.1732	1.302 0	1.492 0
	$r$	0.999 9	0.9997	0.998 4	0.996 7
	$\sigma_e^2$	0.000 07	0.00936	0.135 58	0.589 52
	$l_{xx}$	0.673 43			

差异,用相应的估计量 $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ ,构造检验的统计量:

$$t = \frac{\hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2}{s_w \sqrt{\frac{1}{l_{xx1}} + \frac{1}{l_{xx2}}}} \sim t(n_1 - 1 + n_2 - 1)$$

在给定显著水平  $\alpha$  下进行  $t$  检验,以检验参数是否有显著差异。选取不同裂纹尺寸下幂函数形式拟合的  $C-t$  曲线斜率相差最大的 2 组进行参数检验( $a$  为 0.4, 1.0 mm), 给定  $\alpha=0.05$ , 有:

幂函数形式:

$$t = \left| \frac{1.2759 - 0.9194}{0.2228 \sqrt{\frac{1}{0.67343} + \frac{1}{0.67343}}} \right| =$$

$$0.8678 < t_{0.975}(3+3)$$

同理,分别选取其它 3 种函数形式拟合的  $C-t$  曲线斜率相差最大的 2 组参数进行  $t$  检验,经检验其均通过了  $t$  检验,从而说明 4 种函数形式拟合的  $C-t$  曲线参数均无差异。

### 3.4 C-t 曲线对比分析

预腐蚀裂纹萌生寿命影响系数  $C-t$  曲线如图 1—4 所示,可知幂函数形式和双参数指数函数形式在裂纹尺寸为 0.8, 1.0 mm 处对应的拟合曲线在预腐蚀约 3.5 d 之后出现了比较大的误差,说明在以这 2 种函数形式拟合的不同裂纹尺寸对应的裂纹萌生寿命预腐蚀影响系数通用性比较差,双参数指数函数形式和单参数指数函数形式拟合的参数精度较高。相对而言,单参数指数函数形式拟合效果最好,具有较好的通用性。因此,在相对小的裂纹范围内,不同的裂纹尺寸对应的裂纹萌生寿命预腐蚀影响系数  $C$  宜采用单参数指数函数形式拟合。综合不同裂纹尺寸对应的  $C-t$  曲线参数作为公共参数,或直接采用一种  $C-t$  曲线参数作为公共参数,在腐蚀环境下的飞机结构耐久性分析中提供了极大的方便。

## 4 结论

随着腐蚀时间  $t$  的增加,裂纹萌生寿命预腐蚀影响系数的值会不断下降,随时间变化的规律可用指数或幂函数拟合。根据裂纹扩展( $a, t$ )数据得到典型裂纹尺寸对应的裂纹萌生寿命,从而建立裂纹萌生寿命  $C-t$  曲线,4 种函数形式拟合的不同裂纹尺寸

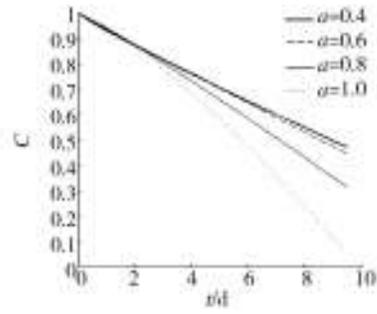


图1 幂函数曲线

Fig. 1 The power function curve

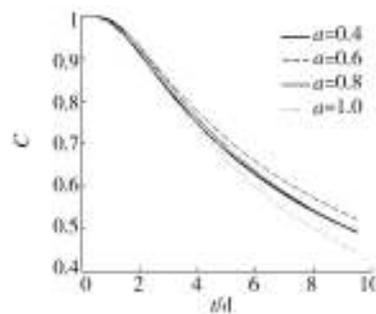


图2 双参数指数函数式2)曲线

Fig. 2 The curve of two-parameter exponential function 2)

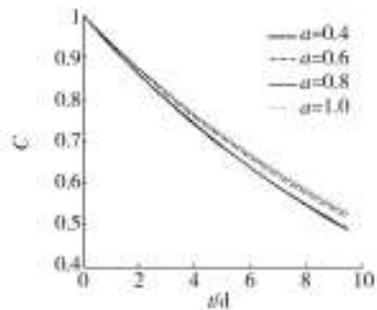


图3 单参数指数函数曲线

Fig. 3 The curve of single parameter exponential function

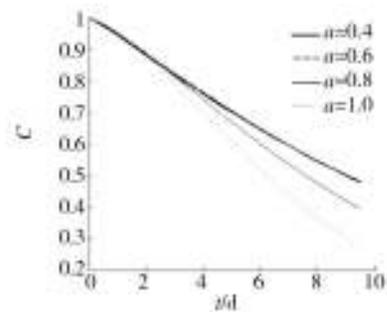


图4 双参数指数函数式3)曲线

Fig. 4 The curve of two-parameter exponential function 3)

(下转第 32 页)

表4 身管破片质量分布

Table 4 Mass distribution of the gun barrel piece

破片 质量/g	破片数目			
	方案1	方案2	方案3	方案4
≤1	132	92	68	44
>1~4	100	36	32	12
>4~8	8	20	8	20
>8~12	8	40	12	12
>12~16	4	8	4	8
>16~20	0	12	4	0
>20~30	0	4	8	0
>30~50	8	4	4	4
>50~100	0	4	20	24
>100	20	36	24	16
合计	280	256	188	140

通过对比4种方案中身管破片的质量分布可以得出:身管破坏程度主要取决于参加爆轰的炸药质量,而起爆位置对破坏程度的影响作用较小。因此,可以通过身管破坏程度判断膛炸事故中炸药爆轰是否完全,即判断膛炸类型是全爆还是半爆,从而为膛炸事故原因分析提供依据。

## 4 结论

1) 建立了合理的模型,采用 ANSYA/LS-DYNA

程序对膛炸现象进行了仿真。

2) 仿真结果表明,弹丸壳体和身管在不同装药和起爆条件下,开始断裂的位置、断裂状态、破片大小和数量等破坏效应之间存在差别。

3) 装药量相同时,中间起爆比端面起爆破坏严重、破片数量多、小质量破片数量多;起爆位置相同时,装药不挖空比挖空破坏严重。

### 参考文献:

[1] 张崇玉,谷岩,张世文,等. 爆轰波对碰驱动下金属圆管膨胀变形特性研究[J]. 爆炸与冲击,2005,25(3):222—226.

[2] 汤铁钢,李庆忠,孙学林,等. 45 钢柱壳膨胀断裂的应变率效应[J]. 爆炸与冲击,2006,26(2):129—133.

[3] 肖绍清,白春华,王小华,等. 分散药起爆方式控制 FAE 燃料分散的数值模拟[J]. 火炸药学报,2001(1):24—26.

[4] 叶小军,韩玉,陈庆宝. 偏心起爆战斗部速度增益的数值模拟及实验[J]. 火炸药学报,2009,32(3):29—34.

(上接第 19 页)

对应的曲线参数均无显著差异。相对而言,单参数指数函数拟合效果最好,对于不同裂纹尺寸对应的裂纹萌生寿命预腐蚀影响系数具有较好的通用性。

### 参考文献:

[1] 陈勃,鲍蕊,张建宇,等. 飞机结构耐久性/损伤容限综合分析模型[J]. 航空学报,2004,25(2):133—136.

[2] 贺小帆,刘文珽,向锦武. 曲线通用性分析和试验研究[J]. 航空学报,2005,26(2):184—189.

[3] 贺小帆. 腐蚀条件下飞机结构寿命可靠性关键技术研究

[D]. 北京:北京航空航天大学,2003.

[4] 高镇同,熊峻江. 疲劳可靠性[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000:74.

[5] 杨晓华. 腐蚀累积损伤理论研究与飞机结构日历寿命分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2002:29—31.

[6] 刘文珽,李玉海. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京:北京航空工业出版社,2004:126—129.

[7] 贺小帆,刘文珽,王忠波,等. 预腐蚀对 30CrMnSiNi2A 连接件疲劳寿命影响的试验研究[J]. 机械强度,2009,31(4):664—669.