

孔蚀对飞机结构静强度影响规律研究*

STUDY ON EFFECTS OF PITTING CORROSION ON THE LAW OF STATIC STRENGTH OF AIRCRAFT STRUCTURE

陈跃良**^{1,2} 谭晓明^{1,3} 段成美¹

(1. 海军航空工程学院 青岛分院, 青岛 266041)

(2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(3. 海军航空工程学院 研究生大队, 烟台 264001)

CHEN YueLiang^{1,2} TAN XiaoMing^{1,3} DUAN ChengMei¹

(1. Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, China)

(2. Aeronautical Institute, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710071, China)

(3. Students' Brigade, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China)

摘要 讨论不同服役年限下,不同腐蚀坑深度、腐蚀坑间距对飞机前梁静强度的影响规律,给出某一腐蚀条件下机翼前梁静强度下降规律。

关键词 孔蚀 飞机结构 有限元法 强度 统计分析

中图分类号 V214 V215.2

Abstract The effected on static strength of front spar due to pitting depths and distance between pits had proposed. The Gumbel distribution was acceptable for the data sets of static strength of front spar. The effected operated time, distance between pits and rank of pits on static strength was discussed.

Key words Pitting corrosion; Aircraft structure; Finite element method; Strength; Statistical analysis

Corresponding author: CHEN YueLiang, E-mail: cyl0532@sina.com, Tel: +86-532-3951654, Fax: +86-532-3951654

Manuscript received 20040430, in revised form 20040726.

1 引言

主要讨论孔蚀对某型机翼前梁静强度的影响,讨论服役时间、蚀孔位置、蚀孔排列顺序以及蚀孔间距等参数对静强度的影响。

2 计算模型与方法

研究对象为某型飞机机翼前梁,是飞机主要承力构件,主要承受弯矩。该结构为工字梁结构,见图1。材料为高强度铝合金,弹性模量 $E = 72\ 571\ \text{MPa}$,泊松比 $\mu = 0.345$,屈服强度为 $570.8\ \text{MPa}$ 。以最大应力为衡量参数,用屈服强度作为材料弹性的临界状态。考虑梁的孔蚀时,假设蚀孔为半球形,蚀孔深度即为半径。

假设梁的根部没有位移,为固定约束,因为前梁主要承受弯矩,把弯矩等效为梁上缘条的压应力、下缘条的拉应力,计算该应力的临界值,即为梁的静强度。采用三维20节点六面体单元进行网格划分,运用三维有

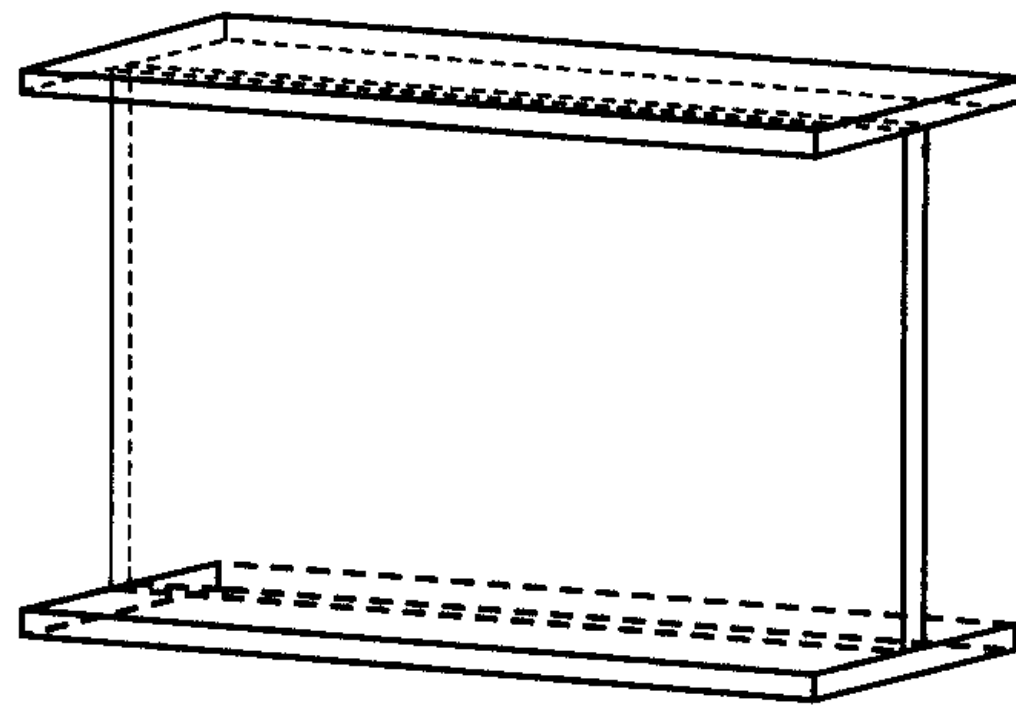


图1 计算模型

Fig.1 The calculation model

限元法进行应力分析。

3 不同蚀孔位置对静强度的影响

根据参考文献[1],某型飞机服役条件下前梁下缘条腐蚀损伤严重,并且腐蚀深度服从 Weibull 分布。根据文献[1]提供的腐蚀深度的统计规律,分别随机取出服役时间为6年、7年、8.5年、10年、12.5年的22个蚀孔尺寸,见表1。

* 20040430 收到初稿,20040726 收到修改稿。

** 陈跃良,男,1962年10月生,浙江东阳人,汉族。教授,博士研究生,研究方向为腐蚀环境下飞机结构寿命及可靠性。

表 1 各服役时间的蚀孔深度

Tab.1 Depths of pits in different years

服役时间/年	蚀孔深度 d/mm											
6	0.6	0.4	0.8	0.3	1.5	1.3	1.4	1.5	0.4	1.5	0.5	
	1.3	0.6	0.9	0.9	1.3	1	0.2	1	0.3	1.7	0.7	
7	1.9	2.2	0.7	0.8	0.5	1.1	1.3	2.3	1.9	0.9	1.2	
	0.5	1.6	1.6	1.7	2.4	1.4	1.7	1.1	0.6	1.8	2	
8.5	0.8	0.9	2.2	2.4	1.4	0.6	1.2	1.6	1.9	0.9	2.8	
	1	0.8	2	1.9	1.5	2	2	1.8	2.1	1	2.9	
10	2.7	0.6	1	3	1.6	2.4	1.4	1.8	2.6	2.4	1.2	
	1.5	2.1	1.7	1.3	2.8	1.9	0.8	2.7	1.8	1.4	3	
12.5	1.5	1.9	3	1.8	1.2	1.3	2.9	1.1	1	1.6	3.4	
	0.9	3.1	1.5	2	3	2.7	2.3	1.8	2.8	0.8	1.7	

假设不考虑腐蚀坑的相互影响,蚀孔之间是等间距的,取间距为 20 mm,蚀孔均匀分布于下缘条的两侧,蚀孔的位置用距离下缘条最外侧的边距衡量。假设边距分别为 5 mm、10 mm、15 mm、...、45 mm,分别建立计算模型进行有限元分析,计算出梁的静强度。定义各腐蚀条件下梁的静强度当量

$$S_e = \frac{S}{S_0} \quad (1)$$

式(1)中的 S 为腐蚀条件下梁的静强度, S_0 为没有腐蚀时的静强度。计算结果如图 2。从图 2 可以看出,蚀孔的位置对梁的静强度影响较大,蚀孔的边距越小,对静强度的影响越大,边距达到一定值后其静强度基本不再发生变化。

4 蚀孔间距对梁静强度的影响

边距均为 5 mm,蚀孔的间距分别取 20 mm、16 mm、12 mm、8 mm、6 mm。分别建立有限元模型,计算结果见表 2。

用表 2 中的数据作图 3,从图 3 中可以看出,蚀孔尺寸越大,随着蚀孔间距的减小,梁的静强度减小的幅

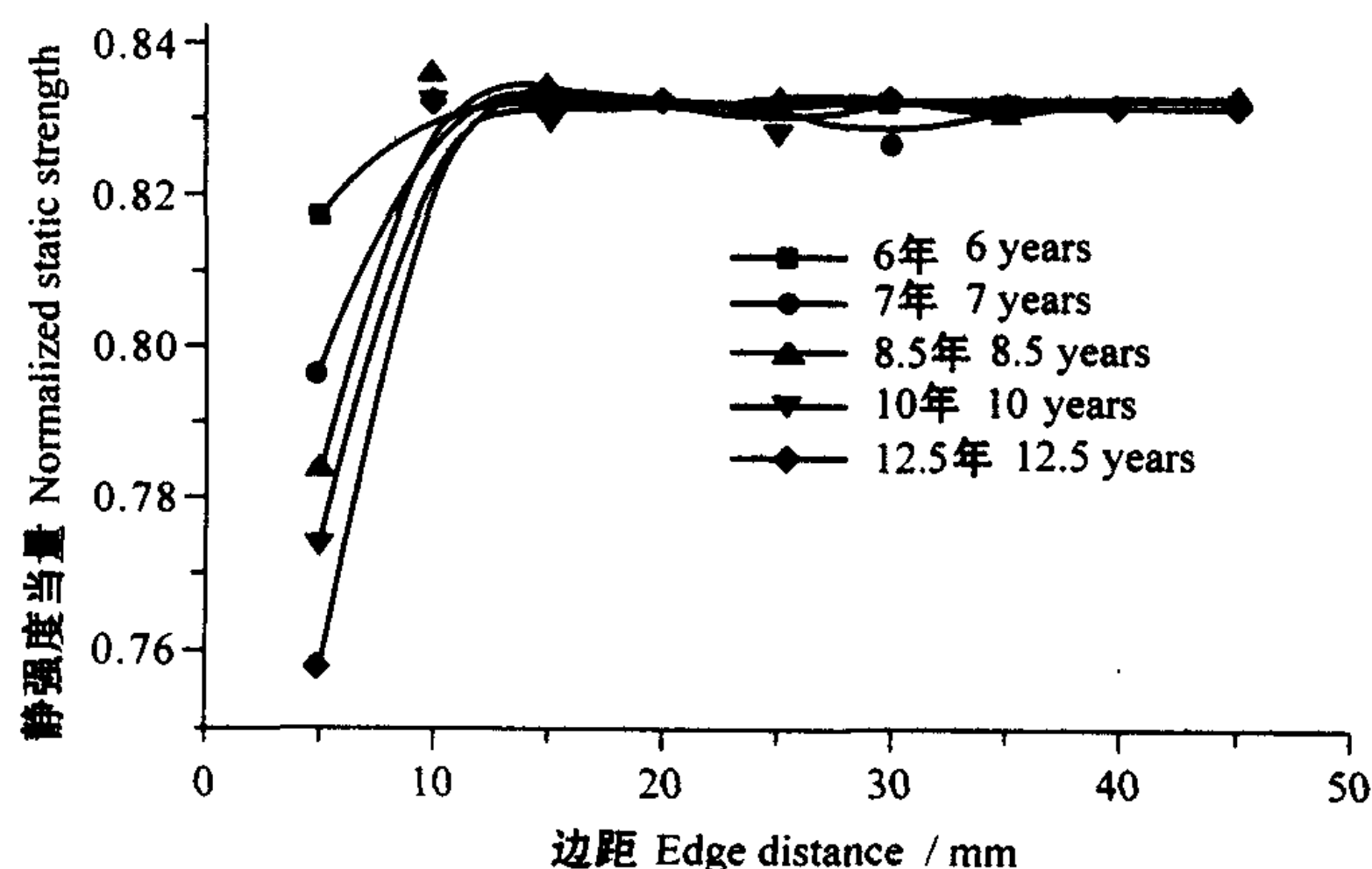


图 2 临界载荷与腐蚀坑位置的关系

Fig.2 Relation between critical load and pits location

表 2 蚀孔间距对梁静强度孔的影响

Tab.2 Effects of distance between pits on static strength

蚀孔间距	静强度当量/MPa				
mm	6 年	7 年	8.5 年	10 年	12.5 年
6	0.764 04	0.755 62	0.716 29	0.672 75	0.629 21
8	0.771 07	0.768 54	0.741 57	0.731 74	0.720 51
12	0.790 73	0.773 88	0.75	0.748 88	0.735 96
16	0.816 01	0.794 94	0.782 3	0.772 47	0.747 19
20	0.817 42	0.796 35	0.783 71	0.773 88	0.758 43

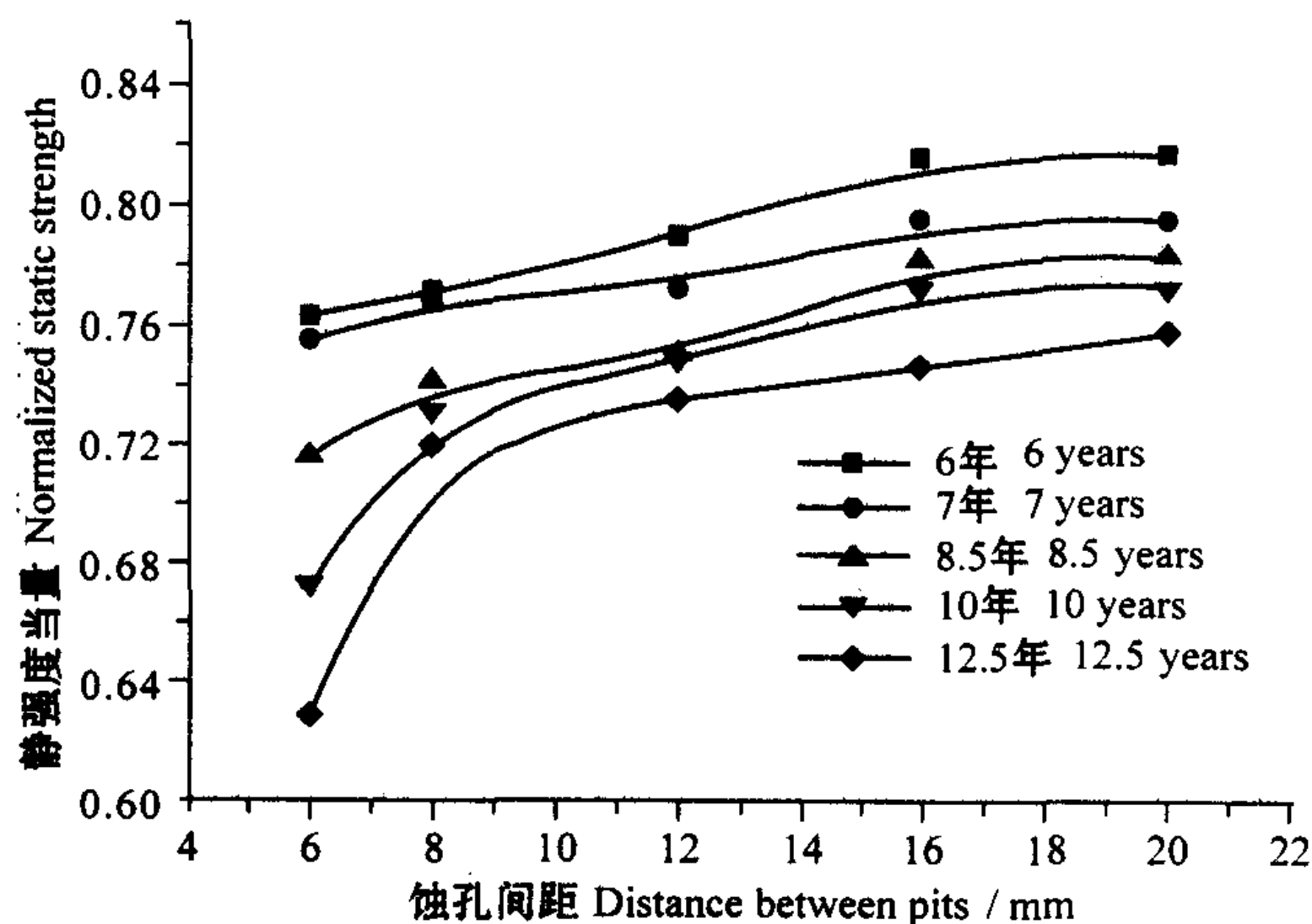


图 3 蚀孔间距对梁静强度的影响

Fig.3 Effects of distance between pits on static strength

度也越大;这是因为同一间距,蚀孔尺寸越大,相互作用的程度越大,因而临界载荷降低越多。

5 不同蚀孔排列顺序对静强度的影响

固定蚀孔的位置,即保持边距为 5 mm 不变,随机改变各组蚀孔的排列顺序,讨论排列顺序对梁的静强度的影响,对每组数据分别计算 6 种排列情况,计算结果见表 3。

表 3 蚀孔排列顺序对静强度的影响

Tab.3 Effects of different sequence of pits on static strength

服役时间 $t/\text{年}$	静强度当量					
6	0.776 12	0.786 52	0.794 94	0.817 42	0.824 44	0.827 25
7	0.778 09	0.778 09	0.796 35	0.801 97	0.801 97	0.808 15
8.5	0.758 43	0.772 47	0.783 71	0.797 75	0.797 75	0.823 03
10	0.744 38	0.772 47	0.773 88	0.789 33	0.792 13	0.806 18
12.5	0.741 57	0.747 19	0.758 43	0.778 09	0.811 24	0.811 80

四种分布类型正态分布、Gumbel 第 I 型极值分布、Logistic 分布和双参数 Weibull 分布,各累积分布函数(cumulative distribution function, CDF) $F(x)$ 分别如下

1) 正态分布

$$F(x) = \int f(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2)$$

2) Gumbel 第 I 型极值分布

$$F(x) = \exp\left[\frac{x-\mu}{\sigma} - \exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right] \quad (3)$$

3) Logistic 分布

$$F(x) = \frac{\exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}{1 + \exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)} \quad (4)$$

4) 双参数 Weibull 分布

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^b\right] \quad (6)$$

表 6 中静强度当量按升序排列 x_1, x_2, \dots, x_n , 第 i 个数据的可靠度估计值为

$$F_e(x_i) = 1 - \frac{i}{n+1} \quad (6)$$

Pearson 相关系数 r 的计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

对表 2 中的数据进行处理, 计算相关系数列入表 3 中。

表 4 4 种分布的相关系数

Tab.4 Correlation coefficient of four different distribution

服役时间 $t/\text{年}$	相关系数 $ r $			
	正态分布	Weibull 分布	Logistic 分布	Gumbel 第 I 极值分布
6	0.966 2	0.970 0	0.962 9	0.969 3
7	0.931 6	0.938 7	0.929 0	0.965 6
8.5	0.984 1	0.976 6	0.985 3	0.974 2
10	0.967 9	0.979 3	0.970 0	0.980 3
12.5	0.954 6	0.938 5	0.950 6	0.955 8

根据文献[2], 在显著水平 α 下满足假设分布的线性相关性临界值由式(8)计算

$$r_c = \frac{t_{\alpha}(n-2)}{\sqrt{n-2+t_{\alpha}^2(n-2)}} \quad (8)$$

当显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时, 即置信水平 $1 - \alpha = 0.95$ 时, $t_{0.05}(6-2) = 2.1318$, $r_c = 0.7293$ 。显然以上五种情况, 四种分布均为高度相关, 最佳拟合应该为 Gumbel 第 I 极值分布, 其分布参数见表 8。图 4 为 5 种服役时间条件下静强度当量的累积分布规律。

Sigma: 0.036 2 0.023 7 0.025 2 0.018 2 0.024 1
mu: 0.791 7 0.790 9 0.800 7 0.800 8 0.815 8

取 $P = 50\%$, 梁静强度随服役时间的变化关系如图 5, 根据曲线特点用一阶指数函数进行数据拟合, 拟合函数见式(9), 相关系数为 0.99。因此当服役时间处

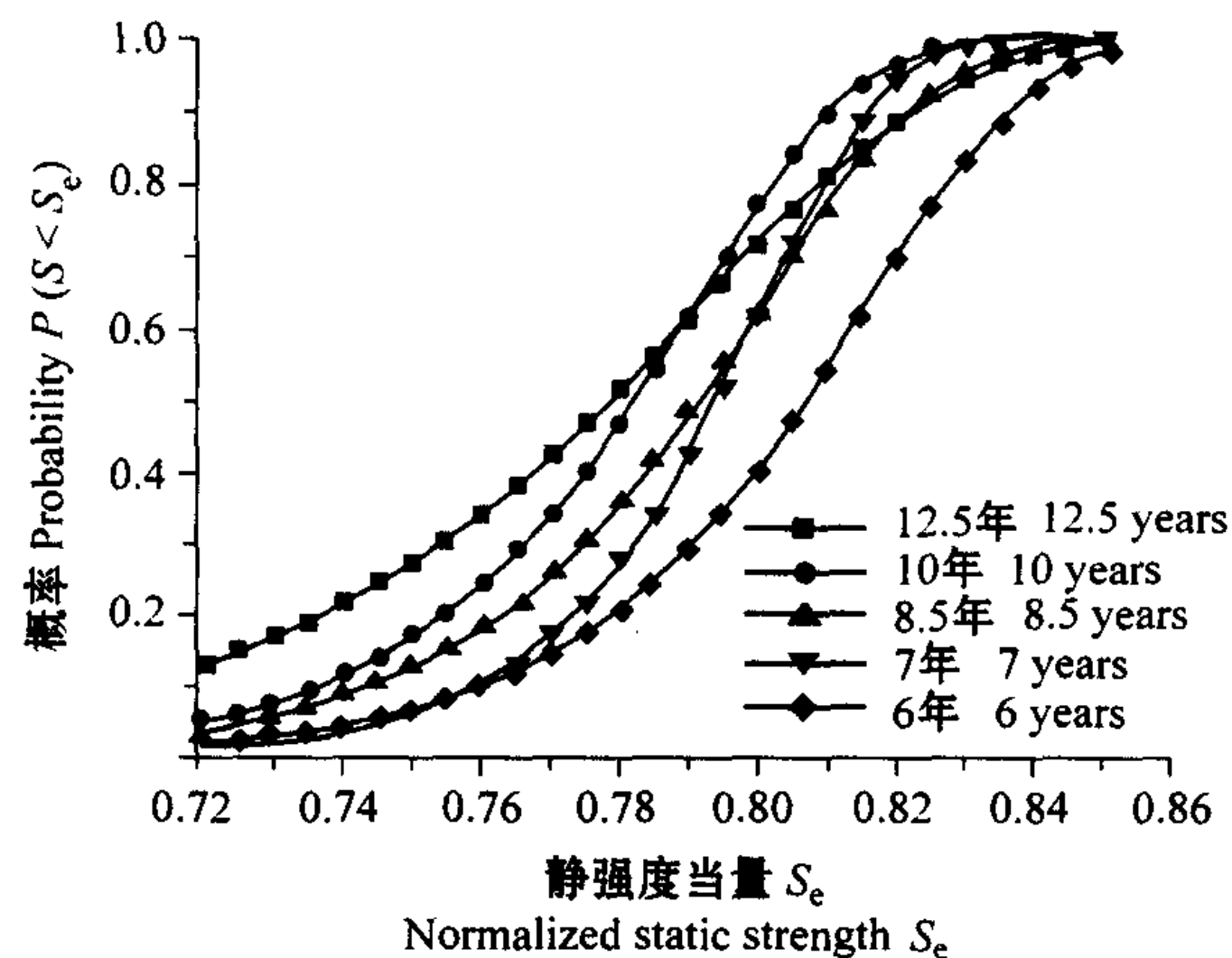


图 4 5 种服役时间条件下静强度当量的累积分布规律

Fig.4 Cumulative distribution rule of normalized static strength in five different service life

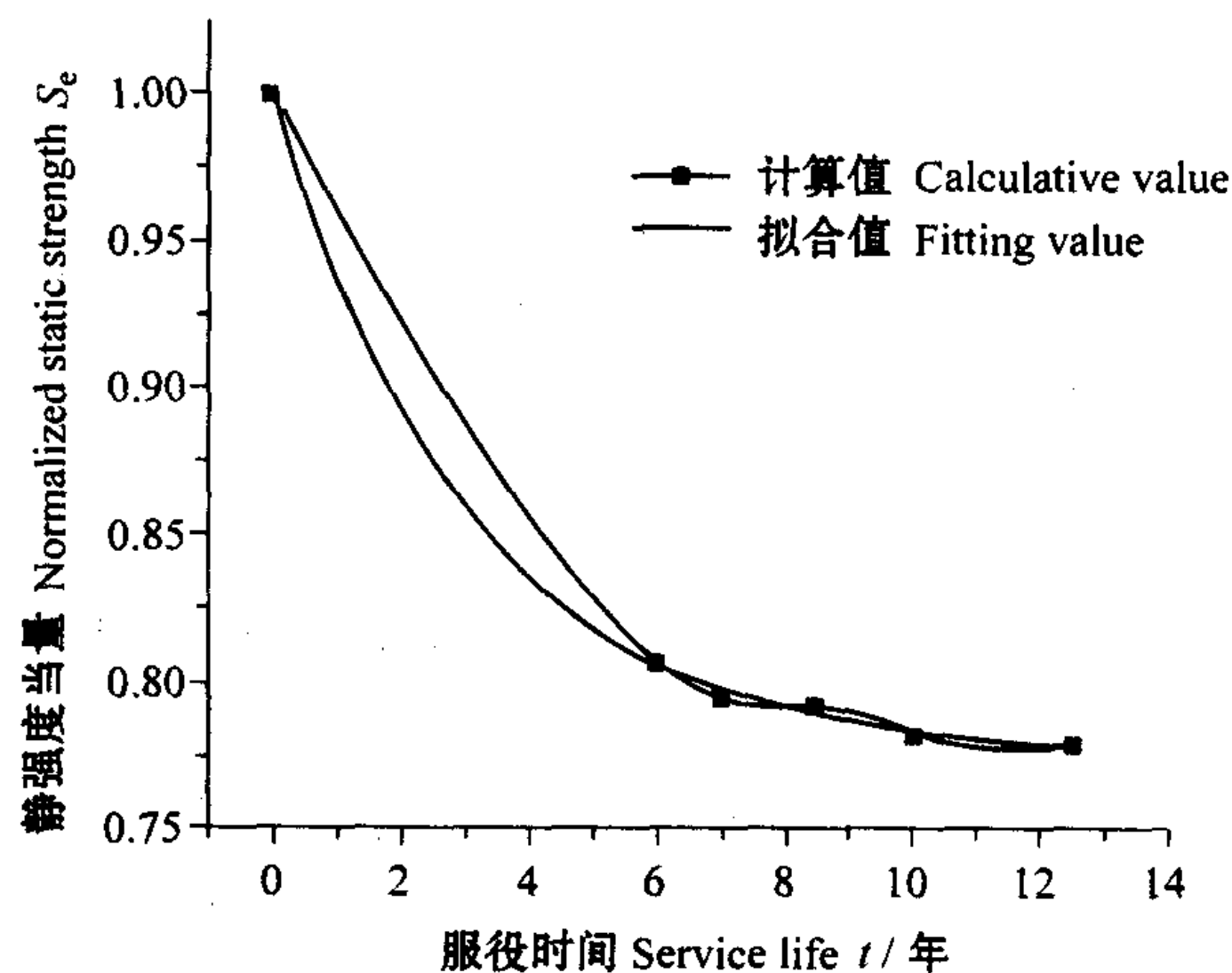


图 5 $P = 50\%$ 时静强度当量和服役时间的变化关系

Fig.5 Relation between static strength and service life

在 0 ~ 12.5 年范围内时, 可以用下式预估该飞机前梁的静强度

$$S = 0.77498 + 0.22502 \exp\left(-\frac{t}{3.017}\right) \quad (9)$$

6 结论

经以上复杂繁多的有限元计算, 通过对计算结果数据的分析, 得出如下结论:

1) 腐蚀坑的存在引起了局部应力集中, 大大减少了梁的临界载荷, 使其静强度大大降低。

2) 梁的临界载荷与腐蚀坑的排列顺序和腐蚀坑处在缘条的相对位置有关。同一蚀坑排列顺序, 腐蚀坑的外边距由小变到大时, 临界载荷与边距大小非线性增大的趋势; 同一腐蚀坑位置, 排列顺序不同, 临界载荷不同。腐蚀坑的边距最小时, 临界载荷最小, 危害最大。

3) 蚀孔尺寸越大, 间距变化对梁静强度的影响越大; 当蚀孔间距大到一定程度时, 蚀孔之间是独立, 没有相互作用。

4) 同一组蚀孔,当边距不变而改变蚀孔的排列顺序时,梁的静强度服从 Gumbel 第 I 极值分布。

References

- 1 Chen Y L, Lu G Z, Duan C M. A probability model for the corrosion damage of aircraft structure in service environment. *Acta Aeronautica et*

Astronautica Sinica, 2002, 23(3):249 ~ 251(In Chinese)(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.航空学报,2002,23(3):249 ~ 251).

- 2 Loftus G R, Loftus E F. *Essence of statistics*. 2ed edn, New York: Alfred A. Knopf, Inc., 1988.