

预腐蚀疲劳寿命分散系数研究

王红斌, 刘海燕

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: 对比分析了3种经典公式计算的不同腐蚀周期下LY12CZ铝合金材料疲劳寿命分散系数 L_t , 研究了 L_t 随腐蚀周期以及应力的变化规律, 并提出了疲劳分散系数的预腐蚀贡献因子的计算公式及与腐蚀影响系数的关系。

关键词: 疲劳分散系数; 预腐蚀; 最大应力

中图分类号: V216.6 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)03-0023-04

Research on Pre-corrosion Fatigue Scatter Factor

WANG Hong-bin, LIU Hai-yan

(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: The fatigue scatter factors of LY12CZ aluminum-alloy with different pre-corrosion times were calculated by three kinds of classical equation and analyzed by contrast with each other. The laws of the fatigue scatter factor change with the maximum stress and pre-corrosion times were studied. The calculating equations of pre-corrosion contribution coefficient were established and the relationship between the coefficient and the corrosion fatigue influencing factor was put forward.

Key words: fatigue scatter factor; pre-corrosion; maximum stress

大气环境腐蚀会导致飞机结构强度及疲劳寿命下降。通常通过实验室加速预腐蚀试验和疲劳试验研究腐蚀对结构疲劳寿命的影响。腐蚀后疲劳寿命的分散程度由疲劳分散系数 L_t 表征。 L_t 定义为: 中值疲劳寿命 N_{50} 除以飞机安全使用寿命 $N_p^{[1]}$ 。 L_t 是飞机结构疲劳定寿中的关键技术参数, 它是飞机结构寿命的定量可靠性指标。

目前, 国内外对未腐蚀结构的疲劳寿命分散系

数研究已屡见不鲜。张福泽^[2]用《航空金属材料疲劳性能手册》中的试验数据, 研究了疲劳分散系数随疲劳试验应力的变化规律。然而, 对于腐蚀试验件的疲劳寿命分散系数的研究却未见报道。

笔者引用赵雪峰等在《预腐蚀疲劳寿命影响系数与S-N曲线研究》一文中所列LY12CZ铝合金材料预腐蚀疲劳寿命试验数据^[3], 运用国内外3种经典疲劳寿命分散系数计算公式, 分别计算了不同腐

收稿日期: 2010-12-30

作者简介: 王红斌(1982—), 男, 山西人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为综合环境强度。

蚀周期、不同应力水平下的疲劳寿命分散系数,研究了腐蚀周期对疲劳寿命分散系数的影响,并对3种经典疲劳寿命分散系数计算公式进行了对比分析。

1 疲劳分散系数计算公式介绍

1) 美国采用的计算公式

$$L_f = 10^{-\mu_r \sigma_0} \quad (1)$$

2) 中国和日本等国家采用的计算公式

$$L_f = 10^{(\mu_r/\sqrt{n}-\mu_p)\sigma_0} \quad (2)$$

3) 英国和澳大利亚等国家采用的计算公式

$$L_f = 10^{-\mu_p \sigma_0 \sqrt{1+1/n}} \quad (3)$$

式中: μ_r 为与置信度相关的标准正态偏量; μ_p 为与可靠度相关的标准正态偏量; n 为试验件数目;

σ_0 为母体标准差。

2 试验数据

研究试验数据引自文献[3]所列加速预腐蚀试验数据(见表1)。试验件材料为LY12CZ铝合金,为增强腐蚀环境对材料力学性能的影响,在进行加速腐蚀试验时,试验件表面无防护层。依据相应加速腐蚀当量环境谱,进行了相当于日历年限3, 8, 13 a的加速腐蚀试验。预腐蚀后的疲劳寿命试验分3个应力级别: 376, 306, 235 MPa, 应力比 $R=0.16$ 。

依据表1中的试验数据,采用上述3种国内外常用的经典公式,计算各组不同腐蚀周期不同应力作用下的试验数据的疲劳分散系数,可靠度 P 取99.87%,置信度 r 取90%,计算结果见表2。

表1 加速预腐蚀疲劳试验数据

Table 1 Data of accelerated pre-corrosion fatigue tests

最大应力 S_{max}/MPa	预腐蚀周期 t/a	疲劳寿命 $N/\text{次}$					对数寿命均值	对数寿命标准差
376	0	9 543	10 996	11 758			4.030 4	0.045 83
	3	4 840	5 206	5 394	6 244	5 421	3.732 6	0.040 00
	8	3 000	3 264	3 368	4 298	4 345	3.557 9	0.073 48
	13	1 806	1 860	2 094	2 726	2 777	3.345 3	0.091 10
306	0	28 564	31 340	30 579	44 128		4.520 5	0.084 26
	3	6 218	6 854	7 737	7 880	8 032	3.863 9	0.047 96
	8	4 750	6 414	7 874	8 928	10 248	3.868 3	0.130 77
	13	2 700	3 002	4 009	5 300	6 010	3.603 0	0.150 67
235	0	114 298	110 711	135 094	108 755		5.067 3	0.043 59
	3	20 510	20 840	23 464	25 394	33 542	4.386 3	0.086 60
	8	14 668	15 872	15 878	19 996	16 752	4.218 6	0.050 99
	13	4 002	4 256	5 794	7 600	8 992	3.765 8	0.153 30

表2 3种公式疲劳分散系数计算结果

Table 2 Results of 3 kinds of fatigue scatter factor equations

腐蚀 周期 t/a	疲劳分散系数								
	376 MPa			306 MPa			235 MPa		
	公式(1)	公式(2)	公式(3)	公式(1)	公式(2)	公式(3)	公式(1)	公式(2)	公式(3)
0	1.372	1.484	1.441	1.790	2.027	1.917	1.351	1.441	1.400
3	1.318	1.390	1.353	1.393	1.484	1.437	1.819	2.039	1.926
8	1.661	1.831	1.744	2.468	2.933	2.690	1.422	1.521	1.471
13	1.876	2.116	1.993	2.831	3.454	3.127	2.883	3.530	3.190

3 腐蚀周期对疲劳分散系数的影响

通过试验结果分析可知,当 t 从0 a延长至13 a时,疲劳分散系数 L (公式(2)计算结果)分别从1.484升至2.116、从2.027升至3.454、从1.441升至3.530。这说明在相同最大应力作用下,疲劳分散系数随腐蚀周期的延长呈增大趋势。

从计算结果可以看出,公式(2)计算的疲劳分散系数最大,表明在研究腐蚀对疲劳分散系数的影响时,采用公式(2)计算疲劳分散系数,使得设计寿命最小,使用安全性最高。另外,随着腐蚀周期的延长,3种公式计算结果差异逐渐增大。

4 预腐蚀贡献因子

假设腐蚀周期与最大应力共同作用下的疲劳分散系数计算公式可表示为:

$$L(t, S_{\max}) = I(t) \cdot L(S_{\max}) \quad (4)$$

式中: $I(t)$ 为预腐蚀贡献因子; $L(S_{\max})$ 为无腐蚀状态时最大应力作用下的疲劳分散系数。

预腐蚀贡献因子随腐蚀周期的变化关系如图1所示。

从图1可以看出,预腐蚀疲劳分散系数贡献因子 $I(t)$ 随腐蚀周期的延长呈非线性增大趋势,随着腐蚀周期的延长,3种公式计算的 $I(t)$ 值差异逐渐增大。

将 $I(t)$ 以 t 为自变量乘幂拟合,结果表明3种不同应力水平下的拟合式系数及幂数有较大差异,这说明 $I(t)$ 不仅是腐蚀周期的函数,还与最大应力有关。将 $I(t)$ 修正为 $I(t, S_{\max})$ 。

$C(t, S_{\max})$ 是预腐蚀 t 时间后的疲劳寿命与无腐蚀情况下的疲劳寿命的比值,称为预腐蚀疲劳影响系数,表征预腐蚀对疲劳寿命的影响程度。显然,无腐蚀情况下, $C(t, S_{\max})=1$ 。在预腐蚀 $t(t>0)$ 时间后, $0 < C(t, S_{\max}) < 1$ 。3种最大应力不同腐蚀周期下的腐蚀影响系数^[3]见表3。

为了建立起预腐蚀疲劳分散系数贡献因子与腐蚀时间及最大应力间的函数关系,在此对预腐蚀疲劳分散系数贡献因子 $I(t, S_{\max})$ 与腐蚀疲劳影响系数 $C(t, S_{\max})$ 变换关系进行研究。

考虑到无腐蚀情况下的预腐蚀贡献因子 $I(t,$

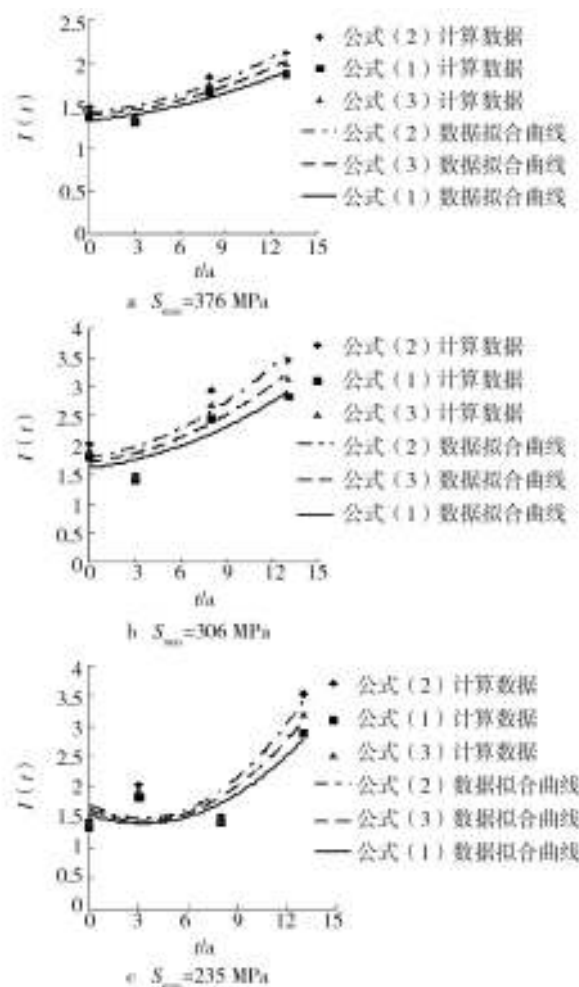


图1 腐蚀贡献因子随腐蚀周期变化规律曲线

Fig. 1 Curves of pre-corrosion influencing factor versus pre-corrosion time

表3 不同腐蚀周期下的腐蚀影响系数

Table 3 corrosion influencing factor at different corrosion times

最大应力 $S_{\max}/\text{MPa}$	腐蚀周期 t/a	腐蚀影响系数 $C(t, S_{\max})$
376	0	1
	3	0.744 1
	8	0.614 5
	13	0.490 6
306	0	1
	3	0.529 6
	8	0.498 6
	13	0.373 2
235	0	1
	3	0.493 9
	8	0.426 7
	13	0.247 6

$S_{\max})=1$,以3种疲劳分散系数公式计算结果拟合的修正公式如下:

$$I(t, S_{\max})=[C(t, S_{\max})]^{-0.5028} \quad (\text{对应公式(1)}) \quad (5)$$

$$I(t, S_{\max})=[C(t, S_{\max})]^{-0.5212} \quad (\text{对应公式(2)}) \quad (6)$$

$$I(t, S_{\max})=[C(t, S_{\max})]^{-0.4608} \quad (\text{对应公式(3)}) \quad (7)$$

式中: $C(t, S_{\max})=e^{-0.915t} \cdot S_{\max}^{0.144t}$, 见文献[3]。

预腐蚀疲劳分散系数贡献因子 $I(t, S_{\max})$ 与预腐蚀疲劳影响因子 $C(t, S_{\max})$ 之间存在如下关系式:

$$I(t, S_{\max})=[C(t, S_{\max})]^{\gamma}, \quad \gamma \leq 0 \quad (8)$$

将 $C(t, S_{\max})$ 关系式代入式(5)、式(6)与式(7), 得:

$$I(t, S_{\max})=e^{0.4601t} \cdot S_{\max}^{-0.0724t} \quad (9)$$

$$I(t, S_{\max})=e^{0.4769t} \cdot S_{\max}^{-0.0751t} \quad (10)$$

$$I(t, S_{\max})=e^{0.4216t} \cdot S_{\max}^{-0.0664t} \quad (11)$$

公式(9)、(10)、(11)分别为对应于公式(1)、(2)、(3)下的 $I(t, S_{\max})$ 计算公式, 由此可得通过3种疲劳分散系数计算公式获得的3种试验最大应力水平下的 $I(t, S_{\max})$ 随 t 的变化关系曲线, 如图2所示。

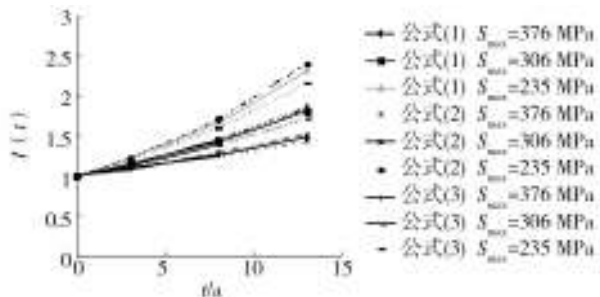


图2 预腐蚀疲劳分散系数贡献因子随腐蚀时间的变化关系
Fig. 2 Curves of pre-corrosion influencing factor versus pre-corrosion time

上述关系式是在应力比 $R=0.16$ 、最大试验应力条件下的腐蚀贡献因子计算公式, 不具有一般性, 需要当量化。

疲劳寿命 Goodman 直线方程为:

$$\frac{S_a}{S_{-1}} + \frac{S_m}{\sigma_b} = 1$$

式中: S_a 为应力幅; S_m 为平均应力; S_{-1} 为在常环境、对称循环条件下材料的疲劳极限; σ_b 为材料抗拉强度。

对恒幅循环载荷, 存在下列关系:

$$S_a = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2}, S_m = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2}, R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}}$$

$$\text{得: } S_{\max} = \frac{2}{\frac{1-R}{S_{-1}} + \frac{1+R}{\sigma_b}} \quad (12)$$

将式(12)代入式(9)、式(10)与式(11), 得:

$$I(t, S_{\max}) = e^{0.4601t} \cdot \left(\frac{2}{\frac{1-R}{S_{-1}} + \frac{1+R}{\sigma_b}} \right)^{-0.0724t} \quad (13)$$

$$I(t, S_{\max}) = e^{0.4769t} \cdot \left(\frac{2}{\frac{1-R}{S_{-1}} + \frac{1+R}{\sigma_b}} \right)^{-0.0751t} \quad (14)$$

$$I(t, S_{\max}) = e^{0.4216t} \cdot \left(\frac{2}{\frac{1-R}{S_{-1}} + \frac{1+R}{\sigma_b}} \right)^{-0.0664t} \quad (15)$$

5 结论

1) 公式(2)计算的疲劳分散系数最大, 设计寿命最小, 使用安全性最高。

2) 在相同最大应力作用下, 疲劳分散系数随腐蚀周期的延长逐渐增大, 且随着腐蚀周期的延长, 3种公式计算值差异逐渐增大。

3) 预腐蚀贡献因子 $I(t, S_{\max}) \geq 1$, 在无腐蚀情况下, $I(t, S_{\max})=1$, 且随腐蚀周期的延长逐渐增大。

4) 预腐蚀贡献因子 $I(t, S_{\max})$ 与预腐蚀疲劳影响系数 $C(t, S_{\max})$ 之间存在关系式为: $I(t, S_{\max})=[C(t, S_{\max})]^{\gamma}, \gamma \leq 0$ 。

参考文献:

- [1] 高镇同. 飞机疲劳分散系数, BH-B844[R]. 北京: 北京航空学院, 1982.
- [2] 张福泽. 疲劳分散系数随应力的变化规律[J], 航空学报, 2007, 28(3): 582—585.
- [3] 赵学锋, 王富永, 赵海军. 预腐蚀疲劳寿命影响系数及 $S-N$ 曲线研究[J]. 机械强度, 2008, 30(6): 977—981.