

LY12-BCZYU 板材纵向裂纹扩展性能研究

何宇廷¹, 杨少华¹, 郭志辉¹, 傅祥炯²

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 西北工业大学 飞机结构强度研究所, 陕西 西安 710072)

摘要: 以 LY12-BCZYU 板材顺向取材的 CCT 试件为研究对象, 分析了其在等幅载荷谱作用下的裂纹扩展性能。拟合得到了 Paris 公式材料常数 c, n 。通过分析其统计分布特性, 检验了 \bar{c}, \bar{n} 的合理性, 计算得到了三种存活率条件下的 $P-a-N$ 曲线及试件的 $a-N$ 曲线, 为结构断裂控制及损伤容限分析提供了支持数据。

关键词: 裂纹扩展; $P-a-N$ 曲线; 统计分布特性

中图分类号: V215.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2000)02-0011-04

现代飞行器设计在强度满足要求的前提下需要重量尽可能轻, 因而多采用比强度高的材料。对于经常承受交变载荷作用的结构, 其抗断裂性能就有可能满足不了要求。因此有必要对其进行损伤容限设计。Paris 公式中的材料常数 c, n 及 $P-a-N$ 曲线是进行损伤容限设计的基础。

LY12-BCZYU 属铝-铜-镁系合金, 是硬铝中强度较高、应用较广的一种, 特别是在新机上应用较多。本文在 MTS810.B 型 $\pm 250\text{KN}$ 电液伺服实验机上, 对 LY12-BCZYU 板材的 CCT 试件进行了等幅加载实验, 得到了等幅载荷作用下裂纹的扩展性能, 依据 Paris 公式推算出了 $\lg da/dN$ 与 $\lg \Delta k$ 之间的关系曲线, 拟合得到了材料常数 c, n , 分析了它们的统计分布特性, 对 \bar{c}, \bar{n} 的合理性进行了验证, 计算得到了材料在三种存活率条件下的 $P-a-N$ 曲线及试件的 $a-N$ 曲线, 为飞机座舱风挡框架的损伤容限设计及评定提供了基础参考数据。

1 试验

1.1 试件准备

将 9 个 LY12-BCZYU- $\delta 4.0$ 板材, 分别制成如图 1 所示的 CCT 试件, 用铅丝切割的方法, 在 $\phi 3$ 孔两边各切一个约 2mm 的槽, 槽的两边各预制一个 1mm 长的裂纹。

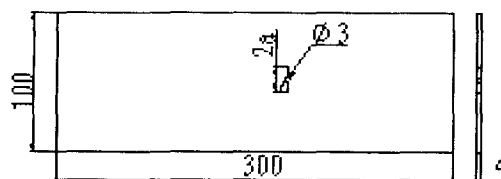


图 1 试件外形

1.2 试验设备及方法

1.2.1 加载部分

试验在室温, 空气环境中进行, 采用 MTS810.B 型 $\pm 250\text{KN}$ 电液伺服实验机, 载荷误差 $< 1\%$, 预制裂纹时加载频率为 20Hz, 试验时加载频率为 15Hz。根据应力比的不同, 将试件分成两组, S_1-S_7 为第一组, $R=0.06$, S_8 与 S_9 为第二组, $R=0.5$ 。

1.2.2 测量部分

在试件上粘贴参考标记, 采用分辨率为 0.1mm 的读数显微镜进行测量, 取试件孔两边裂纹长度读数的平均值作为计算时所用的 a 值, 试件裂纹与切口中心线的偏离量不大于 5° , 每个试件上的读数不少于 20 个。

收稿日期: 1999-12-17

基金项目: 航空基础科学基金资助(97B53011)

作者简介: 何宇廷(1966-), 男, 副教授, 博士。

1.3 试验结果

依据各试件试验所得裂纹长度 a 随加载次数 N 的变化关系绘制曲线(由于第二组试件数量过少,因此不作为研究对象),如图 2。

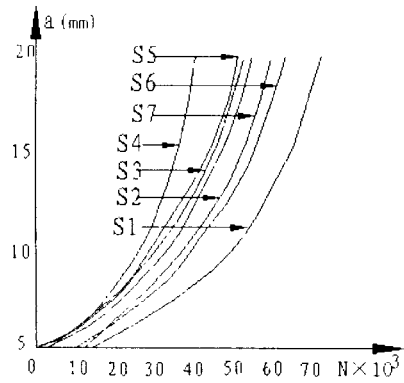


图 2 裂纹长度 a 随加载次数 N 的变化曲线

2 Paris 公式材料常数 c, n 的统计分析

Paris 公式^[1]是目前研究裂纹扩展速率时广泛采用的半经验公式:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \tag{1}$$

其中 c, n 为材料常数。对(1)式两边取对数,有:

$$\lg da/dN = \lg c + n \lg \Delta k \tag{2}$$

且有:

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_i - a_{i-1}}{N_i - N_{i-1}} \tag{3}$$

$$\Delta K_i = \frac{\Delta P}{BW} \sqrt{\pi a \sec \frac{\pi a_i}{w}} \tag{4}$$

由试验数据根据(3)、(4)式,采用七点递推法求出 $\lg da/dN$ 与 $\lg \Delta K$,代入(2)式,即可用数学方法拟合得到材料常数 c, n 。

2.1 计算结果

对应于某个试件的一个测量值 a_i ,可以在直角坐标系上得到一个点 $(\lg \Delta K_i, \lg da_i/dN_i)$,将所有的试验数据依此处理,可以得到 7 条 $\lg da/dN - \lg \Delta K$ 关系曲线,如图 3。从图中可以看出,每条曲线包含三个部分,各部分间斜率差别很大,它们分别代表了断裂扩展的第一、二、三个阶段,由于 Paris 公式只适用于断裂扩展的第二个阶段^[1],故在拟合 c, n 时应将各曲线的第一、三个阶段略去。

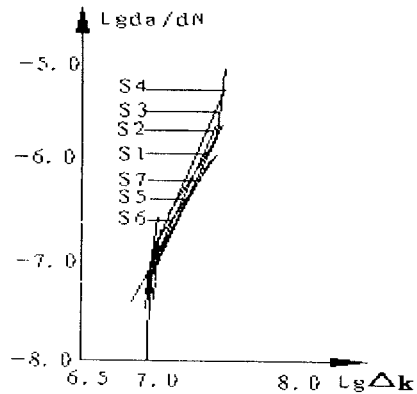


图 3 $\lg \Delta K$ 与 $\lg da/dN$ 的关系曲线

2.2 相关性检验

由数理统计学^[2]可知,相关系数:

$$\gamma = \frac{L_{YX}}{\sqrt{L_{YY}L_{XX}}} \tag{5}$$

其中:

$$L_{YY} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2 \tag{6}$$

$$L_{XX} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \tag{7}$$

$$L_{YX} = \sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i) (\sum_{i=1}^n x_i) \tag{8}$$

根据(5)式求得各试件 $\lg da/dN$ 与 $\lg \Delta K$ 之间的相关系数 γ ,用 γ 值查相关性检验表得到统计各试件的 $\lg da/dN$ 与 $\lg \Delta K$ 之间关系时所需的最少数据个数。由结果可知,各试件的相关系数 γ 均在 0.5 与 1 之间,试件的数据个数均满足要求,因而可以认为,这里 $\lg da/dN$ 与 $\lg \Delta K$ 是线性相关的,读取的数据个数是足够的。

2.3 材料常数 c, n 的拟合

依据最小二乘法^[3],指定回归式:

$$Y = a + bx \tag{9}$$

根据:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i}{n} \tag{10}$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \tag{11}$$

求得拟合直线时偏差平方和最小的 a, b , 进而拟合得到各试件的材料常数 c, n 。分别求出试件 $n, \lg c$ 的平均值 \bar{n} 与 $\overline{\lg c}$, 并由 $\overline{\lg c}$ 求得 \bar{c} , 结果为:

$$\bar{n}_{0.06} = 3.0381; \overline{\lg c}_{0.06} = -28.192; \bar{c}_{0.06} = 1.0871 \times 10^{-10} (m(Pam^{1/2})^{-3.0381})$$

3 材料的 P-a-N 曲线分析

3.1 c, n 总体分布的假设检验

第一组有 7 个试件, 少于 10 个, 故用正态概率纸检验其分布时, 计算 $F^*(t)$ 需采用中位秩近似公式^[2]:

$$F^*(t) = \frac{N_f(t) - 0.32}{N + 0.36} \tag{12}$$

结果表明, 在这两种应力比条件下, $\lg c$ 与 n 基本符合正态分布, 进而可知 c 符合对数正态分布。

3.2 P-a-N 曲线

3.2.1 计算 P-a-N 曲线

根据试验数据, 对各试件取相同的裂纹长度, 利用差分公式:

$$\frac{a_{i+1} - a_i}{a_{i+1} - a_{i-1}} = \frac{N_{i+1} - N_i}{N_{i+1} - N_{i-1}} \tag{13}$$

可求出相同裂纹长度时各试件所对应的扩展寿命, 令:

$$x_i = \lg N_{pi} \tag{14}$$

根据平均秩给出的相应的存活率估计量 \hat{p}_i , 将点 (x_i, \hat{p}_i) 描于正态概率纸上, 可以看出, 指定裂纹长度 x_i 下的概率 $\hat{p}_i - x_i$ 曲线基本成一条直线, 故可认为 x_i 服从正态分布, 而 N_i 服从对数正态分布。

根据公式:

$$[N_p^*]_i = \lg^{-1}(\bar{x}_i + \mu_p \sigma_i) \tag{15}$$

在给出一定的存活率和置信度时, 可求得 $[N_p^*]_i$, 式中 \bar{x}_i 已知, μ_p 可通过查阅文献[4]得到, σ_i 可近似用材料的 σ_i 代替。

以 $(N_{pi99.9\%}, a_i)$ 为点, 在直角坐标系中描点, 可得到存活率为 99.9% 的 P-a-N 曲线, 同理可得到存活率为 0.1%, 50% 时的 P-a-N 曲线。如图 4。

3.2.2 计算 a-N 曲线

对(1)式两边进行积分推导后可以得到:

$$N_p = \frac{2}{\pi^{1/2} C (Y \Delta \sigma)^n (n-2)} \left[\frac{1}{a_0^{n-2}} - \frac{1}{a_i^{n-2}} \right] \tag{16}$$

将拟合得到的 \bar{c}, \bar{n} 及试验所得的各 a_i 值代入式(16), 得到一系列对应的点 (N_{pi}, a_i) , 同样描入图 4 中。由图可知, 拟合得到的曲线比较接近存活率为 50% 的曲线, 这与实际情况是相符合的, 由此也可以说明通过拟合得到的 \bar{c}, \bar{n} 是合理的。

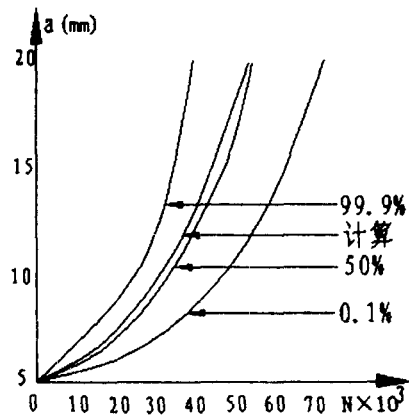


图 4 P-a-N 曲线与 a-N 曲线

4 结论

(1) 本文对 LY12-BCZYU 材料的试件进行了等幅加载试验, 得到了该材料在等幅载荷作用下裂纹的扩

展性能;

(2)依据 Paris 公式推算出了 $\lg da/dN$ 与 $\lg \Delta K$ 之间的关系曲线,二者线性相关;

(3)拟合得到了 Paris 公式的材料常数 c, n , 发现 $n, \lg c$ 基本符合正态分布, c 符合对数正态分布;

(4)得到了材料在存活率为 99.9%、0.1%、50% 时的 P-a-N 曲线与试件本身的 a-N 曲线, 经过比较发现, 后者接近存活率为 50% 的曲线, 这与实际情况是相符合的;

(5)本文得到的 \bar{c}, \bar{n} 及 P-a-N 曲线经过验证是合理的, 可作为飞机座舱风挡框架材料的损伤容限设计与评定的重要参考基础数据。

参 考 文 献

- [1] D·布洛克. 工程断裂力学基础[M]. 王克仁译. 北京:科学出版社,1980.
- [2] 浙江大学数学系高等数学教研组. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,1986.
- [3] 欧阳联渊. 计算机数值计算方法[M]. 西安:空军工程学院,1994.
- [4] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京:国防工业出版社,1986.
- [5] 赵奎元. FORTRAN77 简明教程[M]. 北京:清华大学出版社,1985.

A Study of Vertical Fatigue Crack Growth Rate on Aluminum Alloy Ly12-BCZYU

HE Yu-ting¹, YANG Shao-hua¹, GUO Zhi-hui¹, Fu Xian-jiong²

(1. The Engineering Institute, AFEU., Xi'an 710038, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China)

Abstract: In this paper, the vertical fatigue crack propagation rate of CCT sample under constant amplitude load spectrum was tested. Least-squares fit the Paris equation's constant c and n , and the statistical analysis of c and n is presented. The reasonableness of \bar{c}, \bar{n} is tested. Based on the experimental data, the material's P-a-N curves and sample's a-N curves are gained. The results of the analysis lay a foundation for the damage tolerance analysis of Aircraft Frame.

Key words: fatigue crack propagation; P-a-N curve; statistical analysis