

# LY12CZ铝合金缺口试件在谱载下的疲劳\*

伍义生\*\*

(中国科学院力学研究所)

**摘要** 进行了LY12CZ铝合金缺口试件常幅加载和战斗机宽带随机加载疲劳试验。分别用确定性方法和疲劳谱分析方法估算宽带随机载荷下的疲劳寿命。在确定性方法中比较了峰值计数法、穿零峰值计数法、雨流计数法的差别。在疲劳谱分析方法中比较了窄带累积频次与宽带累积频次法的差别。

**叙词** 疲劳 随机载荷 铝合金

## 1 引言

缺口试件在谱载下的疲劳寿命估算一直是一个重要的问题。谱载下的疲劳寿命估算方法通常分为确定性分析和疲劳谱分析两种方法。这些方法都基于 Miner 线性累积损伤的假定。通常在随机加载下,由于应力次序之间的相互作用,Miner 线性累积损伤的假定不能成立。但经验表明:对于一个没有显著正向或负向超载的随机载荷历程,应力次序的影响不十分显著,用 Miner 假设可以给出较好的估计。但对一个复杂的随机载荷如何确定应力频次,以便用 Miner 假定和 S-N 曲线计算损伤,在确定性分析中,确定复杂随机载荷应力循环的方法有峰值计数法、穿零峰值计数法、雨流计数法等。在疲劳谱分析方法中,一般按窄带随机载荷,假定峰值符合 Rayleigh 分布统计应力频次。而实际上对于一个宽带随机载荷,其峰值应力并不符合 Rayleigh 分布;而应按宽带随机载荷处理。为了比较分析这些处理方法的差别及哪一种更接近实际,本文进行了 LY12CZ 铝合金缺口试件在常幅加载和随机加载下的疲劳试验。用不同的方法计算随机载荷的累积频次曲线和

疲劳寿命,并与试验结果进行了比较。

## 2 试验和试验机

采用带中心孔的 LY12CZ 铝合金薄板试件,应力集中系数  $K_t = 2.60$ ,如图 1 所示。化学成份如表 1 所示。该铝合金的极限强度为  $450.8 \text{ N/mm}^2$ ,屈服应力为  $352.8 \text{ N/mm}^2$ 。试验在 MTS810 (100 kN) 液压伺服疲劳试验机上进行。

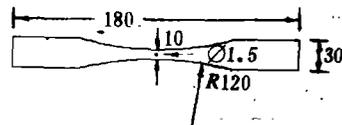


图 1 LY12CZ 铝合金薄板中心孔试件(厚度 1mm)

表 1 铝合金的化学成份

成份	Mg	Cu	Mn	Al
含量(%)	1.62	4.56	0.49	其它

## 3 疲劳试验

### 3.1 常幅加载疲劳试验

在常幅加载疲劳试验中,平均应力保持不变,为  $142.10 \text{ N/mm}^2$ 。试件受轴向加载,试验频率为 5Hz。对应于不同应力幅值的疲劳破坏周次在表 2 和图 2 中给出。

图 2 所示的 S-N 曲线可由下列公式描述:

\* 1991年12月27日收到初稿,1992年3月2日收到修改稿。国家自然科学基金资助项目。

\*\* 伍义生,男,1940年1月生,汉族,副研究员。北京,100080。

表 2 常幅疲劳试验结果

应力幅值 (N/mm <sup>2</sup> )	破坏周次 (×10 <sup>4</sup> )	平均破坏周次 (×10 <sup>4</sup> )
142.10	1.46	1.12
	1.05	
	1.16	
	0.88	
132.30	1.67	1.64
	1.44	
	1.83	
122.50	1.82	1.90
	2.02	
	1.87	
93.10	3.57	3.33
	3.11	
73.50	6.91	7.12
	7.34	
58.80	13.30	15.10
	17.20	
49.00	30.59	30.59

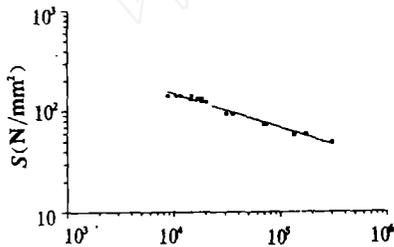


图 2 常幅 S-N 曲线

$$S = AB^B \quad (1)$$

或  $\log S = \log A + B \log N$

式中 S——应力幅值

N——破坏周次

A, B——由线性回归确定的两个参数。

$$A = 3402.76 \text{ N/mm}^2$$

$$B = -0.3396$$

线性回归相关系数  $r = 0.9889$

### 3.2 随机加载疲劳试验

随机加载疲劳试验采用文献[1]的战斗机宽带随机载荷谱。该谱由2600个峰谷值组成,没有明显的正向超载或负向超载(如地-空-地循环等)。将该谱适当修改,使其平均应力与本文

常幅疲劳试验的平均应力相同(142.10N/mm<sup>2</sup>)。峰谷值按适当比例缩小,使其峰值应力的均方根为68.70N/mm<sup>2</sup>。在计算机控制的疲劳试验加载过程中,从每一谷值到峰值,或从峰值到谷值的加载时间为0.1s。谷值到峰值或峰值到谷值的中间载荷值用正弦函数拟合。图3给出一段典型的载荷-时间历程。图4给出该随机载荷的功率谱分析结果。功率谱分析采用文献

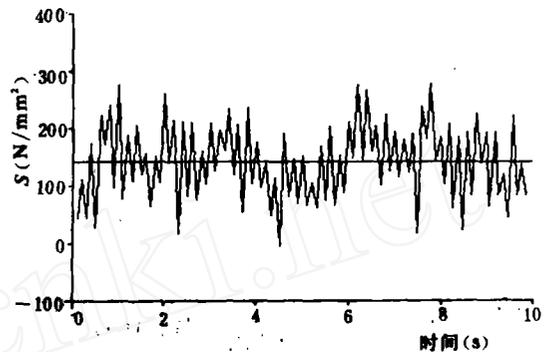


图 3 一段典型的载荷-时间历程

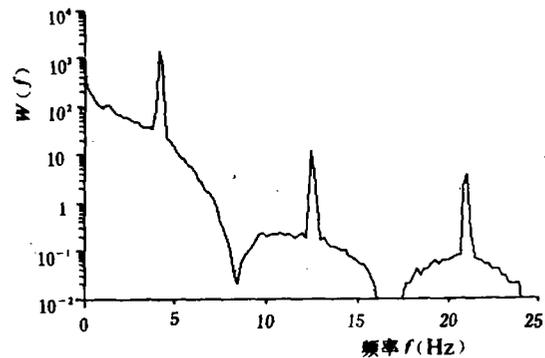


图 4 战斗机宽带随机载荷的功率谱

[2]的周期图法,计算程序用Quick Basic语言编写,在PC-XT微机上进行分析。采样的数据点共15600个,采样时间为0.02s,FFT长度为256,数据窗函数长256,采用汉明窗。从图4可以看出该战斗机随机载荷谱是一个宽带随机载荷,即功率谱的频带具有一定的宽度。我们称每一2600个峰谷序列为一加载块,每块名义循环次数为1300次。由疲劳试验得出的破坏块数和破坏周次在表3中给出。

### 4 累积频次和疲劳损伤计算

由于所选取的随机载荷没有显著的正向或

表3 宽带随机载荷谱试验结果

均方根峰值应力 (N/mm <sup>2</sup> )	破坏块数	平均破坏块数	破坏周次 (×10 <sup>4</sup> )	平均破坏周次 (×10 <sup>4</sup> )
68.70	78	86.2	10.1	11.2
	49		6.37	
	77		10.0	
	91		11.8	
	121		15.7	
	88		11.4	
	114		14.8	
	96		12.5	
	83		10.8	
	65		8.45	

负向超载，正如引言中所说，随机应力次序的影响不十分显著，使应用 Miner 假定估算寿命成为可能。因此本文的重点是，对于图 3 所示的复杂随机载荷时间历程，如何计算载荷循环，确定应力累积频次曲线。在确定性分析中，开始时人们采用峰值计数法、穿零峰值计数法等。现在则倾向于采用雨流计数法<sup>[3,4]</sup>。在谱分析方法中，通常假定随机载荷为窄带的，应力峰值符合 Rayleigh 分布<sup>[5]</sup>。但实际上一个宽带随机载荷的峰值应力并不服从 Rayleigh 分布，而是服从 Rice 分布<sup>[6]</sup>。下面分别用不同的方法进行累积频次和疲劳损伤计算，并与试验结果进行比较，以研究这些不同处理方法的差别。

4.1 累积频次计算方法

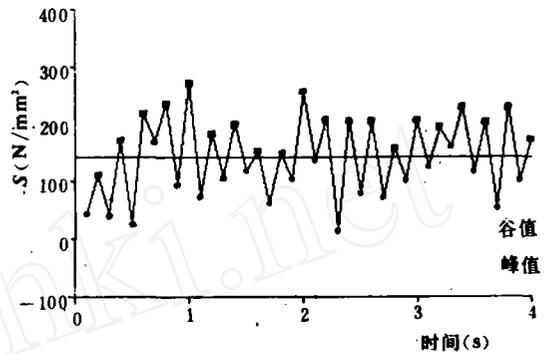
4.1.1 在确定性方法中有以下几种确定应力频次的方法

(1) 峰值计数法 该方法是根据应力峰值的大小进行累积频次统计的，如图 5a 所示。先对峰值进行统计，设随机载荷的平均应力为  $x_m$ ，第  $i$  个应力峰值为  $x_i$ ，则相应的应力幅值为  $S_i = |x_i - x_m|$ 。预先将应力幅值从零到最大分为若干个相等的区间，设置相应的计数数组进行累积频次统计。在此将应力幅值从 0 到 196 N/mm<sup>2</sup> 分为 20 个区间。根据峰值应力的值，将相应的计数存储器加 1。由此得出峰值的累积频次曲线。同样可以得出谷值的累积频次曲线。二者平均即得出按峰值计数法得到的累积

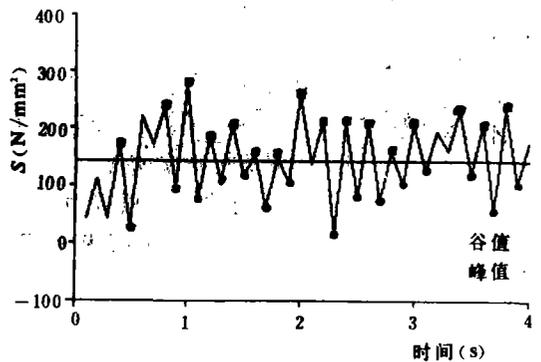
频次曲线。

(2) 穿零峰值计数法 该方法与峰值计数法的差别是，在两个相邻的平均值之间仅取最大的峰值或谷值进行计数，如图 5b 所示。

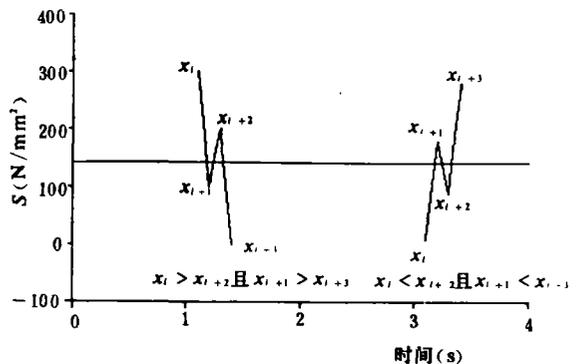
(3) 雨流计数法 雨流计数法是根据雨流计数的法则，从复杂的随机载荷历程中逐次取出应力循环，可详见文献[3,4]。雨流计数法等价于四峰值计数法，利用四峰值计数法可使



(a) 峰值计数法



(b) 穿零峰值计数法



(c) 雨流计数法或四峰值计数法

图 5

计算程序大为简化。凡是相邻4个峰值满足如图5c所示的条件,可取出一次循环。该循环的幅值  $S_a = \text{ABS}(x_{i+2} - x_{i+1})/2$ , 平均值  $S_m = (x_{i+1} + x_{i+2})/2$ 。在取出一个循环后,在载荷时间序列中去掉  $x_{i+1}$  和  $x_{i+2}$  两个峰谷值,再继续按上述原则计数。每一应力循环的应力幅值进行平均应力修正后放入相应的计数数组。平均应力修正按 Goodman 公式进行<sup>[5]</sup>:

$$S'_a = S_a(S_u - x_m)/(S_u - S_m) \quad (1)$$

式中  $S'_a$ ——平均应力修正后的应力幅值  
 $S_a, S_m$ ——每个循环的幅值和均值  
 $x_m$ ——总的平均值  
 $S_u$ ——强度极限

4.1.2 在疲劳谱分析中,为了确定应力累积频次曲线,通常假定随机载荷为窄带的,应力峰值为 Rayleigh 分布。称此为窄带累积频次法。本文则根据宽带随机载荷应力峰值符合 Rice 分布计算应力累积频次,称为宽带累积频次法。

(1) 窄带累积频次法 文献[6]指出对于高斯分布的稳态窄带随机载荷,其峰值应力符合 Rayleigh 分布:

$$P(S) = \frac{S}{\sigma^2} e^{-S^2/2\sigma^2} \quad (2)$$

式中  $P(S)$ ——应力峰值  $S$  的概率密度  
 $\sigma$ ——该随机载荷的均方根应力  
 每一应力区间的累积频次可由以下积分得出:

$$n_i = n \int_s^{s+\Delta s} P(S) dS \quad (3)$$

将(2)式代入(3)式得出:

$$n_i = n \int_s^{s+\Delta s} \frac{S}{\sigma^2} e^{-S^2/2\sigma^2} dS \quad (4)$$

式中  $n$ ——总循环次数  
 $n_i$ ——应力区间  $s \sim s+\Delta s$  的累积频次  
 (2) 宽带累积频次法 文献[7]给出由 Rice 得出的宽带随机载荷应力峰值分布的表达式:

$$P(S) = \frac{\epsilon}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma^2\epsilon}\right) + \frac{S}{2\sigma^2} \sqrt{1-\epsilon^2} \cdot \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{S}{\sqrt{2}\sigma} \frac{\sqrt{1-\epsilon^2}}{\epsilon}\right)\right] \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中  $\epsilon$ ——宽带随机载荷应力频谱的带宽

对于窄带随机载荷  $\epsilon = 0$ , 公式(4)退化为公式(2)。均方根应力  $\sigma$  和带宽由谱分析得出:

$$\sigma^2 = R(0) = \int_0^{\infty} W(f) df \quad (6)$$

$$\epsilon = \left(1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}\right)^{1/2} \quad (7)$$

式中  $W(f)$ ——功率谱密度函数  
 $m_0, m_2, m_4$ ——0次、2次、4次谱矩  
 $R(0)$ ——时刻为零时的自相关函数

对于本文的随机载荷,由谱分析得出  $\sigma = 56.55 \text{ N/mm}^2, \epsilon = 0.8775$ 。将(5)式代入(3)式得出宽带随机载荷下的累积频次计算公式:

$$n_i = \int_s^{s+\Delta s} \left\{ \frac{\epsilon}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma^2\epsilon}\right) + \frac{S}{2\sigma^2} \sqrt{1-\epsilon^2} \cdot \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{S}{\sqrt{2}\sigma} \frac{\sqrt{1-\epsilon^2}}{\epsilon}\right)\right] \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma^2}\right) \right\} dS \quad (8)$$

#### 4.2 疲劳损伤计算

前已指出,由于所采用的随机载荷无明显正向和负向超载,应力次序的影响不十分显著。因此用 Miner<sup>[8]</sup> 线性累积损伤假定计算疲劳损伤:

$$D = \sum n_i / N_i \quad (9)$$

式中  $n_i$ ——各级应力的累积频次  
 $N_i$ ——由常幅  $S-N$  曲线得出的与应力  $S_i$  相应的破坏周次

将(3)式代入(9)式得:

$$D = \sum \frac{n_i}{(S_i/A)^{1/B}} \quad (10)$$

破坏块数 BTF 和相应的寿命 Life 由下式给出:

$$\begin{aligned} \text{BTF} &= 1/D \\ \text{Life} &= \text{BTF} \cdot n \end{aligned} \quad (11)$$

#### 5 计算结果

图6给出由不同方法得出的累积频次曲线。表4给出疲劳寿命估算结果与试验结果的比较。从图6和表4可以看出,在确定性方法中,对于本文的随机载荷由峰值计数法和雨流计数法得出的累积频次曲线相差不十分显著。由峰值

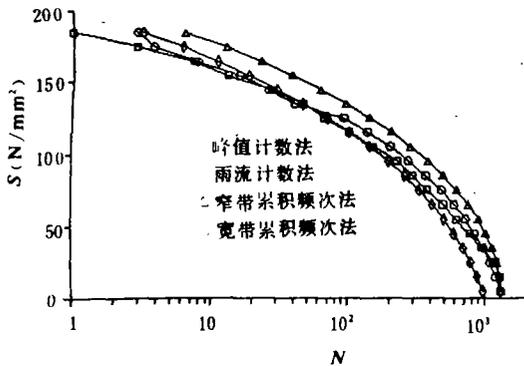


图6 由不同方法得出的累积频次曲线

表4 疲劳寿命估算结果

方法	寿命	破坏块数	破坏周次 ( $\times 10^4$ )
峰值计数法		55.0	7.15
穿零峰值计数法		58.6	7.62
雨流计数法		65.8	8.55
窄带累积频次法		38.2	4.96
宽带累积频次法		72.5	9.43
试验		49.0~121.0 平均86.2	6.37~15.7 平均11.20

计数法得出的累积频次曲线,其应力幅值略高于雨流计数法得出的结果,因此计算得出的疲

劳损伤也偏于严重一些。两种方法估算的结果均落在试验分散带内,相当于试验平均寿命偏安全一侧。在疲劳谱分析方法中,由于窄带累积频次法不恰当地假定应力峰值符合 Rayleigh 分布,因而得出的累积频次曲线应力幅值偏高,计算的疲劳损伤偏于严重。而用宽带累积频次法得出的累积频次曲线与确定性方法得出的结果相近,估算的寿命落在试验分散带之内。

### 6 结 论

(1)对没有显著正向超载和负向超载的随机载荷,用 Miner 线性累积损伤假定可以给出较好的寿命估计。

(2)在几种不同的计数法方法中,窄带累积频次法因过高估计了应力幅值,因而估计的疲劳损伤偏于严重,给出较低的疲劳寿命估算结果。

(3)峰值计数法、雨流计数法、宽带累积频次法估计的结果落在试验分散带内,相对于试验平均寿命而言仍是偏于安全的。在这三种计数方法中,峰值计数法估算的损伤较严重,雨流计数法和宽带累积频次法估算的结果最接近试验平均寿命。

### 参 考 文 献

- 1 Chang J B. Round-Robin Crack Growth Predictions on Center-Cracked Tension Specimens under Random Spectrum Loading. ASTM STP 748, 1981: 17~21
- 2 中国电子仪器仪表学会信号处理学会. 数字信号处理程序库. 北京: 清华大学出版社, 1983: 221~234
- 3 徐灏. 疲劳强度设计. 北京: 机械工业出版社, 1981: 499~461
- 4 高镇同. 疲劳应用统计学. 北京: 国防工业出版社, 1986: 169~176
- 5 Frost N E et al. Metal Fatigue. Clarendon Press, Oxford, 1974
- 6 Newland D E, 方同等译. 随机振动与谱分析概论. 北京: 机械工业出版社, 1980: 96~98
- 7 Lin Y K. Probabilistic Theory of Structural Dynamics. McGraw-Hill, 1967: 303
- 8 Miner M A. Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics, 1945: 12

## FATIGUE OF LY12CZ NOTCHED SPECIMEN UNDER SPECTRUM LOADING

Wu Yisheng

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)