

# 尺寸对LC9-CS铝板疲劳 裂纹扩展速率的影响

刘俊洲 欧阳辉

## 一、引言

近年来许多研究者从不同角度研究尺寸效应的影响因素,并从微观机制和物理模型来解释其尺寸效应,以提出在工程上估算疲劳裂纹扩展寿命的有效方法。尺寸效应不仅取决于试样的宽度、厚度、有效的长度,还和材料的屈服强度、应力比 $R$ 、应力状态、载荷历程、环境介质及裂纹尖端塑性区的单调和循环加载特性所引起的疲劳损伤有着密切关系。

本文介绍了在实验室气氛中对LC9-CS铝板所作的试验,裂纹扩展速率在大于 $10^{-5}$  mm/cycle的范围内,对尺寸影响作了初步探讨并得到了一些较好的结果。

## 二、试验过程

### 1. 试验用料

试验用料为5mm厚的板材,其化学成分见表1。热处理制度为465℃淬火,135℃/8~16h时效。其机械性能见表2。试样选用中心裂纹拉伸试样(CCT),其尺寸列于表3。

表1 试验用料的化学成分 (Wt%)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr
1.36	2.86	0.083	0.42	0.093	6.10	0.18

表2 机械性能

E	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_b$	$\delta_5$	$K_c$
MPa			%	MN/m <sup>3/2</sup>
64793	502.1	558.0	11.7	57.4

表3 试样几何形状参数

W	L	d	$2a_n$	$2a_n/W$
mm				%
100	210	3	12	12
200	510	6	16	8
300	810	6	30	10
400	910	6	46	11.5
500	1010	6	50	10

### 2. 试验条件

选用两种试验方案,其一,应力比 $R$ 为0.43,最大应力为68.6MPa,最小应力为29.4MPa;其二,应力比 $R$ 为0.1。为使各组试样的初始 $\Delta K$ 在类似相同(7.4~8.7MN/m<sup>3/2</sup>)的情况下进行比较,选用了不同的应力水平。

除了 $W=100$ mm一组试样在ZD-20Pu疲劳试验机进行之外,其它均在Amsler50T双向疲劳试验机进行。

疲劳裂纹检测使用5倍放大镜对试样表面进行目测,记录裂纹长度 $a$ 及相应的循环次数 $N$ 。在可见宏观裂纹达0.5mm时记录 $N_0$ 为成核阶段的疲劳寿命。

### 3. 数据处理

由得到的 $a-N$ 数据点,进行七点一组的分段拟合求导,算出各对应裂纹长度的 $da/dN$ 及应力强度因子范围 $\Delta K$ 。按Forman经验公式用最小二乘法拟合数据,定出经验公式的常数 $C$ 和 $n$ ,在 $da/dN-\Delta K$ 的双对数坐标上给出拟合线和 $da/dN$ 数据分散度的可变因子 $VF$ , $VF=\exp(4S)$ , $S$ 为剩余标准离差。试验结果用恒幅疲劳裂纹扩展速率试验的数据处理及寿命估算的ALGOL程序用DQ-16型电子计算机进行处理。

### 三、试验结果

现将部分试验结果的图表列举如下。

表4列出了 $R=0.43$ 初始疲劳寿命与总疲劳寿命的比较。

表 4

S	n	$N_i, \times 10^3$	$N_0, \times 10^3$	$N_p, \times 10^3$
88	3	72.4	13.2	59.2
184	3	93.6	10.8	82.8
270	3	50.8	5.7	45.1
354	2	36.2	2.1	34.1
450	3	26.0	1.8	24.2

S为静截面宽度, mm; n为试验次数;  $N_0$ 及 $N_p$ 为在出现宏观可见裂纹0.5mm时初始疲劳寿命及至断裂前扩展寿命;  $N_i$ 为初始疲劳与疲劳扩展总的寿命。

R为0.1, 0.43及不同宽度试样的 $da/dN$ 总寿命比较结果列于表5。其中 $N_i$ 为由 $2a_0$ 至断裂的循环次数。

表 5 疲劳寿命 ( $N_i$ )

W mm	R	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\Delta K$	$N_f(\text{平均})$
		MPa		$MN/m^{3/2}$	$\times 10^3$
100	0.1	44.62	4.462	7.53	155.07
200		53.25	5.325	8.72	253.30
300		27.65	2.765	7.73	404.48
400		23.24	2.324	7.32	811.37
500		21.77	2.177	7.65	944.60
100	0.43			7.41	70.70
200				10.19	93.63
300		68.65	29.42	10.12	50.83
400				10.93	36.15
500				11.48	26.00

图1、2分别给出 $R=0.1$ 和 $R=0.43$ 按

Forman公式拟合的 $da/dN-\Delta K$ 关系曲线。

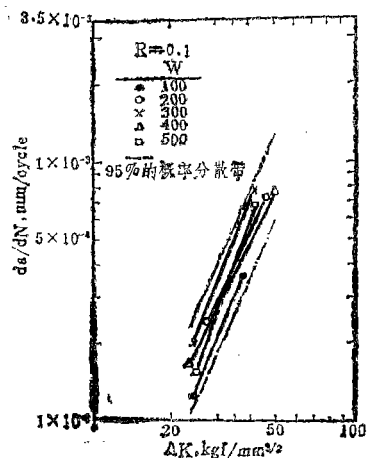


图 1  $R=0.1$ ,  $da/dN-\Delta K$ 关系曲线

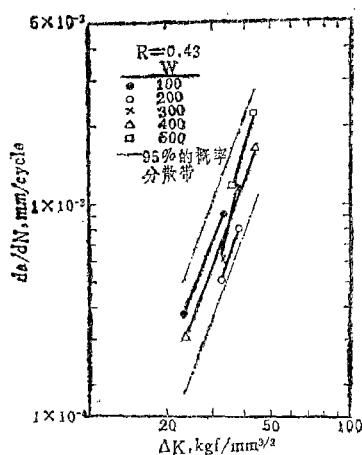


图 2  $R=0.43$ ,  $da/dN-\Delta K$ 关系曲线

### 四、结果讨论

#### 1. 尺寸对起始疲劳寿命的影响

起始阶段终点 $N_0$ 是通过5倍的放大镜所观察可见裂纹0.5mm来定义的。这个定义虽不精确,但对于总体的分散度来说已足够。

在协调尺寸中,注意到了中心孔和线切割长度与试样宽度尺寸成比例,初始线切割 $2a_0$ 基本保证约占各自宽度的10%左右。预计各组别不同宽度试样的应力集中系数相近似,这一

点将有助于分析 $N_0$ 值。

试验结果表明,不同组别随着试样宽度的增加(由100至300mm)  $N_0$ 点显著降低(由13.2千循环降至1.84千循环)。此结果由静强度理论认可。由于试样形状决定于宽度和中心孔径,通常经验地确定 $N_0$ 是二维函数,即 $N_0 = f(s \cdot d)$ 。此外,在初始恒定应力下裂纹尖端的塑性区趋于一个稳定值。

从表4可以看出,在低应力比下总的疲劳寿命 $N_f$ 随着试样宽度的增加而增加;在较高应力比下总的疲劳寿命随着试样宽度增加而略有下降的趋势。

由于直至破坏发生的任何疲劳损伤过程是由两个不同特性阶段组成,尺寸在这不同性质的两个阶段中也不同地影响着。因此对这两个阶段应分别加以研究。

## 2. 疲劳断裂寿命

从图1可以看出,当 $R=0.1$ 按Forman经验公式进行拟合时,试样宽度由100增至300mm,  $da/dN$ 也随着增加,而到400、500mm时 $da/dN$ 又略降低,即随尺寸的增加至300mm宽时,趋于一个饱和值。但由于差别很小,基本上可以忽略。当 $R=0.43$ 时,就没有上述明显的规律。若以一定的应力比下五个组别的 $da/dN-\Delta K$ 数据作为一个母体的95%概率分散带作比较,各个组别的 $da/dN$ 数据基本上落在分散带内。

在不同的应力比下,之所以能分别落在母体的95%概率分散带内,由线弹性理论所定义的裂纹尖端应力强度因子的依据是保证试样几何时尺寸的弹性条件占统治支配地位,足以防止在有效的试验数据测量期间韧带上发生大范围屈服。若能满足线弹性理论对试样尺寸的要求,需考虑如下三个因素。

其一,由 $(W-a) = \frac{P_{max}}{B \sigma_{0.2}}$ 规定的条件是否对应该材料开始时的塑性形变,尤其是那些对单调应变硬化敏感的材料。

其二,该材料疲劳裂纹扩展速率受这些塑

性形变的影响如何。

其三,计算的应力强度因子是否受塑性形变的影响。

Hudak等人曾作了研究分析。满足线弹性对无裂纹韧带的要求,对于CCT试样

$$\sigma_N \leq \sigma_{0.2} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \sigma_N = \frac{P}{BW(1-2a/W)} \quad (2)$$

依据方程(1)和(2)对试样无韧带要求是:

$$(W-2a) \geq \frac{P_{max}}{B \sigma_{0.2}} \quad (3)$$

其次要看单调加载和循环加载的塑性区尺寸是如何依据方程的要求的。对于平面应力条件的 $2r_y$ 由下式给出

$$2r_y = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{K_{max}}{\sigma_{0.2}} \right]^2 \quad (4)$$

$$\text{即 } \frac{2r_y}{(W-a)} = \frac{1}{4}$$

因此尺寸要求的单调塑性区大约是无裂纹韧带的25%。

对于循环加载平均应力塑性区尺寸( $2r_y^c$ )可近似计算为

$$2r_y^c = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{\Delta K}{\sigma_{0.2}} \right)^2 \quad (5)$$

由方程(4)单调塑性区尺寸与方程(5)之比为

$$\frac{r_y^c}{r_y} = \frac{(1-R)^2}{4} \left( \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{\infty}^c} \right)^2 \quad (6)$$

经Hudak等人的研究证明,对于CT、CCT试样的尺寸规格化,加载条件等数值分析与上述方程是一致的。

我们所作的柔度标定试验结果与上面表达式所要求的尺寸很吻合。所得的有关尺寸预测与形变测量是一致的。在单调塑性位移是无裂纹韧带的25%,以至继续到接近完全屈服载荷。在迟滞不明显时载荷作为位移记录的函数是由于循环塑性区相当小。虽然变形过程中循环塑性区可以控制裂纹扩展这种现象是明显的,但由线弹性理论对试样尺寸要求已基本上限制在单调塑性区范围内。

# 有机玻璃断口形貌的扫描电镜观察

一三二厂 肖 敏 杨秀如

## 前 言

正确显示断口形貌是正确认识断裂机理的基础。资料[1, 2]已对有机玻璃断口形貌显示的方法作了较为详细的介绍;有的资料<sup>[1, 3, 4]</sup>将有机玻璃静拉、静弯、冲击、疲劳断口分作三个区域:镜面区、平坦区(雾区+肋状)、粗糙区(瞬断区)。但对三区细微特征的介绍还停留于光学成象的初级阶段,并且不尽详细。因此弄清各种断口各区细微特征,有益于正确认识断裂形成、受力方式乃至断裂机理。但由于受光学显微镜景深、放大倍数等自身条件的限制,势必给断面起伏大的有机玻璃断口的准确显示带来困难,甚至造成假象。因此有必要借助分辨率高、放大倍数大、景深长的电镜进行断口形貌的显示和研究。为此,我们开展了 YB-3 有机玻璃断口扫描电镜成象技术的试验研究。

## 一、试验条件

### 1. 原理

当外加电子束与某物质作用时,产生如图 1 的一些物理信号:对这些信号进行接收,导致阴极射线管荧光屏上不同区域出现不同的亮度,从而获得具有一定衬度的图象<sup>[5]</sup>。这些物理信号往往反映了该物质形貌、原子序数、晶体结构或位向等特征。

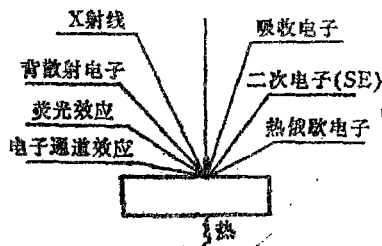


图 1



综上所述,只要尺寸满足线弹性断裂力学对韧带尺寸的要求,尺寸对疲劳裂纹扩展速率试验基本无影响。

## 五、结 论

1. 在恒幅加载条件下,当 $R=0.43$ 、最大应力 $68.65\text{MPa}$ 、最小应力 $29.42\text{MPa}$ 时,尺寸对疲劳起始寿命有显著的影响,随着试样宽度由 $100\text{mm}$ 增至 $500\text{mm}$ , $N_0$ 点显著降低。

2. 在本试验条件下,尺寸对于疲劳裂纹

扩展速率试验基本无影响。

3. 在恒幅下施加相同的初始应力水平虽然疲劳损伤过程较为复杂,但只要尺寸满足线弹性断裂力学对韧带尺寸的要求,尺寸对疲劳裂纹扩展速率试验基本无影响。应注意到,就其在95%概率分散带内仍有差异,发现在相应点的扩展速率正比于试样的宽度这一趋势。显然在保证线弹性要求条件下,尺寸大的试样数据要偏保守些。

(参考文献从略)