

# 双悬臂 (DCB) 预裂纹试样 $K_I$ 的标定

张 思 九 陈文英 徐福源

## 序 言

自从断裂力学理论应用于应力腐蚀断裂领域以后, 逐渐研制出了一些测定材料的所谓界限应力强度因子  $K_{Isc}$  参量的试验方法。尤其近些年来, 已有几种试验方法越来越多地应用于研究各种材料的应力腐蚀断裂性能<sup>[1, 2]</sup>。对于铝合金的研究来说, 大都采用 DCB 试样。这种试样裂纹尖端应力强度因子  $K_I$  的表达式, 已有不少人做过试验研究<sup>[1, 3, 4]</sup>, 国内、外通用的公式是:

$$K_I = \frac{EVh[3h(a+a_0)^2+h^3]^{1/2}}{4[(a+a_0)^3+ah^2]} \quad (1)$$

但迄今为止, 仍有一些问题没有得到统一, 例如: ①在用 DCB 试样进行铝合金的应力腐蚀试验时, 裂纹前缘不是平直的, 而呈弧形, 如图 1 所示。这就涉及到裂纹长度如何测定的问题, 目前还是众说纷

云<sup>[4, 5]</sup>; ②在(1)式中,  $a_0$  是经验旋转修正量, 在许多应用中只把它作为梁高的函数, 即  $a_0 = 0.6h$ , 这样做似乎不太妥当。

鉴于上述情况, 我们在建立 DCB 试样应力腐蚀试验方法的过程中, 对试样柔度  $V/P$ — $a/h$  关系及上述等问题也作了适当的研究。

## 标定试验方法

标定用的试样是 LC4CS 的 DCB 试样, 试样形状和尺寸见图 2。

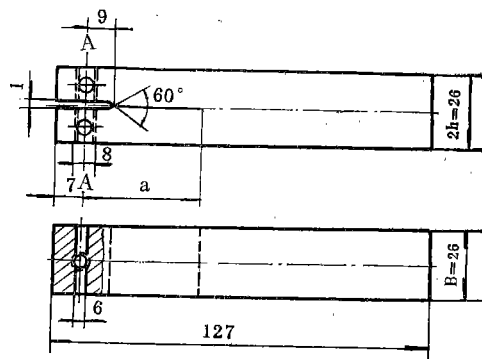


图 2 DCB 试样图

将一组 DCB 试样 (本研究用 7 个) 用线切割 (切缝的宽度约为 0.16 毫米) 的方法切取不同裂纹长度, 裂纹前缘为直线。然后在标定用试验机或普通拉伸试验机上, 在试样的加载中心线处 (图 2 中的 A-A 处) 对试样施加载荷。加载过程中, 应保证试样的加载中心处随着试样臂的不断张开能自由转动, 所用载荷低于 600 公斤。在加载过程中, 用夹式引伸计和静态电阻应变仪测得不同裂纹长度和不同载荷时加载中心线处的张开微应变, 然后再根据得到的微应变用螺钉加载, 用大型工具显微镜测试样双悬臂在加载中心线处的张开位移  $V$ , 计算  $V/P$  (或  $EBV/P$ ) 值。所取裂纹长度  $a$  的范围是从 15.000~60.000 毫米, 即  $a/h$  为 1.162~4.621。所得数据见表 1。其后, 根据标定试验数据, 求得  $EBV/P$ — $a/h$  关系式。同时确定裂纹尖端应力强度因子  $K_I$  表达式。另外, 对

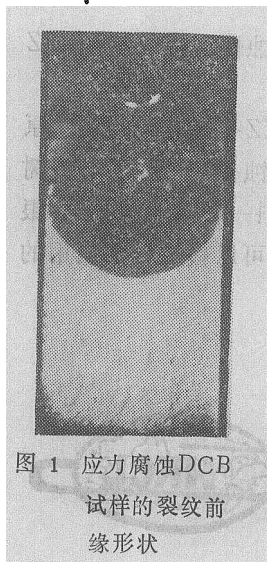


图 1 应力腐蚀 DCB 试样的裂纹前缘形状

按材料力学推导出来的 $V/P$ 表达式, 加入裂纹根部弹性效应修正量 $a_0$ , 并确定 $a_0$ 的表达式, 进而求得 $K_I$ 表达式。

对于经过应力腐蚀试验后而具有弧形裂纹前缘的试样, 用同样的装置和方法取得 $V/P$  (或者 $EBV/P$ ) 值, 按照用直裂纹前缘的试样所标定推得的公式计算等效裂纹长度 $a_0$ , 并确定测量应力腐蚀裂纹长度的方法。

## 结果和讨论

### 1. 直裂纹前缘DCB试样的柔度标定及 $K_I$ 表达式

根据弹性力学理论, 该试样的柔度表达式的形式为:

$$\frac{EBV}{P} = \alpha_1 (a/h)^3 + \alpha_2 (a/h)^2 + \alpha_3 a/h \quad (2)$$

式中:  $E$ ——材料的弹性模量, 公斤/毫米<sup>2</sup>,  
一般铝合金 $E=7200$ ;

$B$ ——试样厚度, 毫米;

$P$ ——载荷, 公斤;

$V$ ——载荷为 $P$ 时, 试样加载中心线处双臂的张开位移, 毫米;

$a$ ——从加载中心线开始测量的裂纹长度, 毫米;

$h$ ——悬臂高度, 或试样半高, 毫米;

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 及 $\alpha_3$ 为待定系数。

标定试验结果见表1。

表1 直裂纹前缘DCB试样的  
 $V/P-a/h$ 数据

试样	a	h	a/h	B	标定的 $V/P$	由式(3)计算的 $V/P$
005	15.107	13	1.6226		$2.25 \times 10^{-4}$	$2.25 \times 10^{-4}$
002	20.160	13	1.5526		$4.19 \times 10^{-4}$	$4.20 \times 10^{-4}$
006	24.826	13	1.9126		$6.76 \times 10^{-4}$	$6.76 \times 10^{-4}$
007	29.607	13	2.2826		$1.03 \times 10^{-3}$	$1.03 \times 10^{-3}$
008	34.809	13	2.6826		$1.55 \times 10^{-3}$	$1.53 \times 10^{-3}$
003	40.133	13	3.0926		$2.17 \times 10^{-3}$	$2.17 \times 10^{-3}$
004	60.076	13	4.6226		$6.26 \times 10^{-3}$	$6.26 \times 10^{-3}$

将表1的数据代入(2)式得到下式:

$$\begin{aligned} \frac{EBV}{P} = & 8.3631 \left( \frac{a}{h} \right)^3 + 14.4635 \left( \frac{a}{h} \right)^2 \\ & + 8.1444 \left( \frac{a}{h} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

按(3)式计算得到的 $V/P$ 值一并列于表1。可见(3)式与标定数据是吻合的。

根据弹性力学和断裂力学理论, 平面应变情况下裂纹尖端的应力强度因子 $K_I$ 与能量释放率 $G$ 之间的关系为:

$$K_I^2 = \frac{E}{1-\mu^2} G$$

式中:  $\mu$ ——泊松比, 铝合金取0.3。

$$G = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{d}{da} \left( \frac{V}{P} \right)$$

$$\begin{aligned} \therefore K_I &= \sqrt{EG/(1-\mu)} \\ &= \frac{P}{Bh^{1/2}} \left[ \frac{1}{2(1-\mu^2)} \frac{d(EBV/P)}{d(a/h)} \right]^{1/2} \quad (4) \end{aligned}$$

将(3)式对 $a/h$ 求导数, 并把由(3)式求得的 $P$ 的表达式均代入(4)式, 便可得到:

$$K_I = \frac{EV[13.8(a/h)^2 + 15.9(a/h) + 4.5]^{1/2}}{h^{1/2}[8.4(a/h)^3 + 14.5(a/h)^2 + 8.1(a/h)]} \quad (5)$$

### 2. 确定裂纹根部旋转修正项 $a_0$ 并确定 $K_I$ 表达式

首先假定DCB试样的悬臂部分是弹性体, 裂纹根部是刚性体, 则由弯矩和剪应力引起加载中心线处的总位移为:

$$\begin{aligned} V &= \frac{2Pa^3}{3EJ} + \frac{3}{G} \frac{Pa}{Bh} = 8 \frac{Pa^3}{EBh^3} + \frac{3}{G} \frac{Pa}{Bh} \\ &= \frac{8P}{EBh^3} (a^3 + ah^2) \end{aligned}$$

实际上, 裂纹根部是弹性体, 考虑弹性效应, 对弯矩的影响予以修正, 即裂纹长度 $a$ 增加一个修正项 $a_0$ , 而为 $(a+a_0)$ , 于是便为:

$$\frac{V}{P} = \frac{8}{EBh^3} [(a+a_0)^3 + ah^2] \quad (6)$$

由(6)式可得到 $a_0$ 的表达式为:

$$a_0 = \sqrt[3]{\frac{EBh^3}{8} \frac{V}{P} - ah^2} - a \quad (7)$$

可见,  $a_0$  不仅仅与  $h$  有关, 因此令  $a_0 = 0.6h$  的经验修正是不够妥当的。但 (7) 式较繁, 为计算方便, 不妨予以简化。将标定的数据代入 (7) 式, 便可得到图 3 的曲线。把  $a_0$  与裂纹长度  $a$  近似为线性关系。用最小二乘法得到如下的表达式:

$$a_0 = 0.042a + 5.343 \quad (8)$$

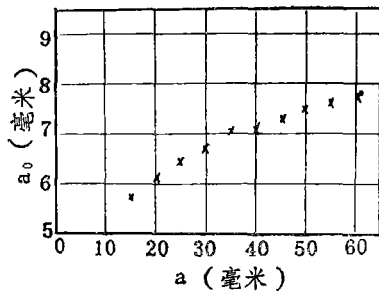


图 3  $a_0$  与  $a$  的关系曲线

须注意,  $a_0$  还与  $B$ 、 $h$  有关。但本研究所用试样的几何尺寸已定,  $h$ 、 $B$  均为常量。如果改变几何尺寸, 须适当加以修正, 此处就不多加讨论了。

根据弹性力学和断裂力学理论,

$$K_I = \sqrt{\frac{E}{1-\mu^2} G} \quad (G \text{ 为能量释放率})$$

$$= \sqrt{\frac{E}{1-\mu^2} \frac{P^2}{2B} \frac{d}{da} (V/P)} \quad (9)$$

将有关量  $P$ 、 $\frac{d}{da} (V/P)$  及  $\mu$  (取  $\mu = 0.3$ ) 代入 (9) 式后, 便得到:

$$K_I = \frac{EVh[3.1h(1.04a+5.4)^2+h^3]^{1/2}}{3.8[(1.04a+5.4)^3+ah^2]} \quad (10)$$

### 3. 三个 $K_I$ 表达式的比较

为便于比较, 将本研究所标定的 (5) 式和 (10) 式以及目前国内外通用的公式即 (1) 式均变为无量纲表达式  $\frac{K_I h^{1/2}}{EV} = f\left(\frac{a}{h}\right)$ , 可分别得到:

$$\frac{K_I h^{1/2}}{EV} = \frac{[13.8(a/h)^2 + 15.9(a/h) + 4.5]^{1/2}}{[8.4(a/h)^3 + 14.5(a/h)^2 + 8.1(a/h)]} \quad (11)$$

$$\frac{K_I h^{1/2}}{EV} = \frac{[3.1h(1.04a/h+5.4/h)^2+h]^{1/2}}{3.8h^{1/2}[(1.04a/h)^3+5.4/h]} \quad (12)$$

$$\frac{K_I h^{1/2}}{EV} = \frac{[3h(a/h+0.6)^2+h]^{1/2}}{4h^{1/2}[(a/h+0.6)^3+a/h]} \quad (13)$$

将 (11)、(12) 及 (13) 式示于图 4, 不难看出 (11) 与 (12) 式吻合很好, 但 (13) 式的差别较大。

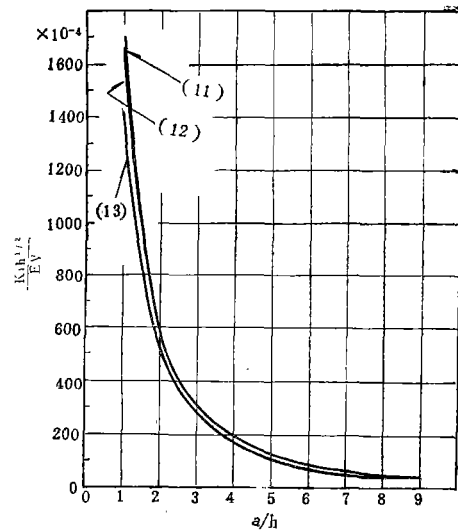


图 4  $\frac{K_I h^{1/2}}{EV} - a/h$  曲线

为了更清楚起见, 不妨计算一下几个不同裂纹长度下三个  $K_I$  表达式的相对误差。计算结果见表 2。可以看出, (11) 与 (12) 式很接近, 而 (13) 式相差较大。所以在用 DCB 试样进行应力腐蚀试验时, 计算  $K_{I_{ccc}}$  取 (11) 及 (12) 式即 (5) 及 (10) 式均可。

### 4. 等效裂纹长度 $a_e$ 的标定

本研究的目的是解决铝合金 DCB 试样应力腐蚀后如何测量裂纹长度的问题。它是将做过应力腐蚀后的试样标定  $V/P$  值, 然后代入 (3) 式或 (6) 式求得  $a$  值, 这样求得的  $a$  值称为等效裂纹长度  $a_e$ 。根据等效裂纹长度值确定测量前缘为弧形的裂纹长度。

表 3 给出了一组经应力腐蚀试验的 DCB 试样的标定及有关计算数据。

根据所标定的数据以及计算出的等效裂纹长度, 选用下述的方法测量裂纹长度:

$$a_e = [3(a_1 + a_4) + a_2 + a_3] / 8 \quad (14)$$

该式中  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  及  $a_4$  的取值见图 5。实际测量的结果一并列表 3。

表 2 不同 $K_I$ 表达式在不同裂纹长度下的相对误差

a/h	表达式 I, %	表达式 II, %	表达式 III, %
1.0	6.0	23.4	18.5
1.3	3.1	19.0	16.4
1.5	1.9	16.8	15.3
2.0	0.1	12.9	12.9
3.0	-1.0	8.6	9.6
4.0	-1.0	6.5	7.5
5.0	-0.8	5.3	6.0
6.0	-0.5	4.6	5.0
7.0	-0.3	4.0	4.3
8.0	0.2	3.8	3.7
9.0	0.4	3.5	3.1

注: 表达式 I 即  $\frac{K_I^{(11)} - K_I^{(12)}}{K_I^{(11)}} \times 100\%$ ;

表达式 II 即  $\frac{K_I^{(11)} - K_I^{(13)}}{K_I^{(11)}} \times 100\%$ ;

表达式 III 即  $\frac{K_I^{(12)} - K_I^{(13)}}{K_I^{(12)}} \times 100\%$ 。

$K_I^{(11)}$  为 (11) 式的  $K_I$ ;  $K_I^{(12)}$  为 (12) 式的  $K_I$ ;  $K_I^{(13)}$  为 (13) 式的  $K_I$ 。

表 3 应力腐蚀试验后的DCB试样 V/P 及有关数据

试样	标定的 V/P 毫米/公斤	用(3)式 计算的裂 纹长度 毫 米	用(6)式 计算的裂 纹长度 毫 米	用(14)式计 算的裂纹长度 毫 米
005	$4.70 \times 10^{-4}$	21.609	21.160	22.415
002	$9.77 \times 10^{-4}$	28.994	29.087	28.902
006	$1.23 \times 10^{-3}$	31.878	31.991	31.028
007	$1.81 \times 10^{-3}$	37.250	37.371	36.658
008	$2.32 \times 10^{-3}$	41.809	41.199	40.409
003	$3.36 \times 10^{-3}$	47.447	47.515	48.454
004	$8.07 \times 10^{-3}$	66.035	65.875	66.806

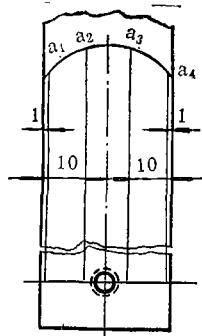


图 5 裂纹长度测量值位置图

## 结 论

1. 根据本研究的实际标定认为, 计算DCB试样的 $K_I$ 值取 (5) 式和 (10) 为宜。为统一及计算方便起见, 推荐(10)式:

$$K_I = \frac{EVh [3.1h(1.04a_e + 5.4)^2 + h^3]^{1/2}}{3.8 [(1.04a_e + 5.4)^3 + a_e h^2]}$$

2. 试验时, 应使 $a/h > 1.3$ , 最好是 $a/h > 1.5$ 。

3. 有效裂纹长度 $a_e$ 的测量暂定为按图 5 所示测量, 取值为:

$$a_e = [3(a_1 + a_4) + a_2 + a_3] / 8$$

本研究承蒙北京航空学院张行副教授多方指导和帮助, 特表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] M. V. Hyatt, Use of Precracked Specimen in Stress—Corrosion Testing of High-Strength Aluminium Alloys, 1969, AD709047, 55P.
- [2] R. C. Dorward and K. R. Hasse, Corrosion Science, Vol. 19, No. 3 (1979), P. 131
- [3] B. F. Brown, Stress-Corrosion Cracking in Highstrength Steel and in Titanium and Aluminium Alloys, 1972.
- [4] R. M. Bonesteel, D. F. Piper and A. T. Davinroy, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 10, No. 2, 1978, P. 425.
- [5] 工程断裂力学, 北京钢铁研究院金属物理室编, (1977), P. 173~175.