

# 含中心裂纹铝合金薄板 裂纹稳态扩展的实验研究

薛以年 韩金虎 徐纪林

(中国科学院 力学研究所)

## 一、引言

对于韧性材料的含裂纹构件,通常是在大范围屈服情况下断裂的,所以必须建立弹塑性断裂理论来进行研究.用 $J$ 积分判据 $J_{Ic}$ 或临界裂纹顶端张开位移 $\delta_{cr}$ 来衡量韧性材料的断裂韧性,在工程上具有实用意义.但是 $J_{Ic}$ 和 $\delta_{cr}$ 都是用来确定裂纹的初始起裂,而起裂后的裂纹稳态扩展现象很重要,特别对于硬化材料的金属薄壁构件更为明显,在裂纹缓慢稳态扩展的过程中,必须继续增加载荷,直到裂纹失稳扩展,因此要合理地确定含裂纹薄壁结构的承载能力,就需要研究裂纹稳态扩展过程.

Fedderson<sup>[1]</sup>在研究平面应力断裂问题中,用铝合金中心裂纹板试件做了大量实验,对工程设计提供了有用的分析方法,但是对于裂纹的稳态扩展过程只做了定性描述,没有给出载荷与裂纹扩展量的对应关系.Anderson<sup>[2]</sup>和Varanasi<sup>[3]</sup>用有限元法对平面应力的裂纹稳态扩展进行了弹塑性分析,前者采用裂纹顶端的两单元边之间的张开角达到某一临界值作为裂纹扩展准则,后者采用裂纹顶端最大主应力达到材料拉伸极限强度作为裂纹扩展准则,但缺乏实验数据与他们的计算结果作比较.文献[4]提出了一个平面应力的弹塑性断裂模型——带状颈缩区模型,将Dugdale模型推广到弹塑性变形场情形,并用有限元法计算了中心裂纹薄板的裂纹张开位移和应力应变场,结果与实验数据符合良好.在文献[4]的基础上,文献[5]进一步用大变形弹塑性有限元法计算了裂纹的稳态扩展过程.该文采用的裂纹扩展准则是:当裂纹顶端颈缩区上下边界的相对伸长达到材料的延伸率时裂纹向前扩展,其计算结果与本文实验结果符合得很好.

本工作对受拉伸载荷的含中心裂纹铝合金薄板试件进行平面应力断裂的实验研究,测得了裂纹起裂载荷和失稳载荷,以及裂纹稳态扩展量与载荷增加的对应关系,并进行了讨论.此外,用云纹法测量了裂纹张开位移和垂直于裂纹方向的位移全场分布,还测量了裂纹在稳态扩展过程中裂纹顶端的相对伸长,结果表明,此相对伸长接近材料的延伸率.因此以裂纹顶端颈缩区的相对伸长达到材料延伸率作为裂纹扩展的准则<sup>[6]</sup>在一定程度上得到了实验的验证.

本文于1981年8月22日收到.

## 二、试件和实验方法

含中心裂纹铝合金薄板试件的材料为三种: LY12—CZ, LY12—CS 和 LC9—CS, 它们的材料性能数据见表 1, 这是由原板材的材料拉伸试件测得的. 表中  $\alpha$  和  $n$  是近似描述材料的指数曲线表达式  $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \left[ \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n - 1 \right]$  中的参数.

表 1

材 料	弹性模量 $E$ (kg/mm <sup>2</sup> )	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	极限强度 $\sigma_b$ (kg/mm <sup>2</sup> )	屈服应变 $\varepsilon_{0.2}$	延伸率 $\varepsilon_f$	$\alpha$	$n$
LY12—CZ	7100	32.5	45.5	0.0046	0.184	0.01	8
LY12—CS	7100	32.5	45.2	0.0046	0.143	0.0075	8
LC9—CS	6500	49.0	55.0	0.0069	0.125	0.003	30

试件的几何尺寸见图 1, 各试件的厚度和初始裂纹长度列于表 2 中. 试件的中心裂纹是先用线切割然后预制疲劳裂纹而成; 其中有四个试件未预制疲劳裂纹, 用以考察预制疲劳裂纹与否对裂纹扩展的影响.

本实验是在专门设计的加载架上进行的, 通过机械式千斤顶加载, 载荷值由应力环的百分表读出, 这里要求做到载荷控制加载, 所以当裂纹扩展时, 由人工操作使载荷基本保持恒定. 我们用读数显微镜(三十倍和八十倍)读测试件表面的裂纹扩展量. 通过显微镜, 试件裂纹的起裂和稳态扩展过程观察得比较清楚.

本实验采用云纹法测量试件的变形. 这里应用文献[6]中的云纹法测量方法, 在逐级加载的过程中, 用照相记录各级载荷下的云纹图, 然后在投影仪上进行观测读数.

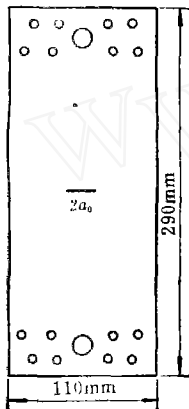


图 1

## 三、实验测量结果

本实验共进行了十七个试件, 实验结果列于表 2 中. 其中:  $t$ ——试件厚度,  $2a_0$ ——初始裂纹长度,  $2a_c$ ——失稳裂纹长度,  $\sigma_{i(起)} = \frac{\text{起裂载荷}}{W \cdot t}$ ,  $\sigma_{c(失)} = \frac{\text{失稳载荷}}{W \cdot t}$ ,  $\sigma_{i(净)} = \frac{\text{起裂载荷}}{(W - 2a_0) \cdot t}$ ,  $\sigma_{c(净)} = \frac{\text{失稳载荷}}{(W - 2a_0) \cdot t}$ ,  $W$ ——试件宽度,  $\Delta_f$ ——在裂纹稳态扩展过程中裂纹顶端上下相距为试件厚度的两点之间的相对伸长. 带 \* 号的试件未预制疲劳裂纹.

图 2 举例给出试件在裂纹稳态扩展过程中载荷与裂纹扩展量的对应关系  $P \sim \Delta a$  曲

表 2

试件	材 料	t (mm)	2a <sub>0</sub> (mm)	2a <sub>2</sub> (mm)	σ <sub>i</sub> (名) (kg/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>c</sub> (名) (kg/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>i</sub> (净) (kg/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>c</sub> (净) (kg/mm <sup>2</sup> )	Δ <sub>f</sub>
1	LY12-CZ	0.45	11.79	15.28	29.7	31.6	33.3	36.7	0.20
2			12.36	14.66	27.8	30.7	31.3	35.5	0.19
3			12.62	15.82	26.3	30.7	29.8	35.6	0.21
4*			11.05	—	31.3	31.9	35.0	—	—
5		0.89	4.65	7.75	34.8	35.6	36.3	38.2	0.18
6			5.81	8.22	33.5	35.3	35.5	38.2	0.18
7			11.55	15.27	29.2	32.6	32.8	37.9	0.18
8			18.30	23.29	23.4	28.9	28.2	36.8	0.19
9			23.78	27.40	23.4	27.0	30.1	36.1	0.18
10*			10.10	—	30.5	31.0	33.6	—	—
11	LY12-CS	1.50	13.46	17.62	30.6	32.2	34.9	38.4	0.12
12			14.47	18.89	30.4	32.0	35.0	38.7	0.11
13			21.68	24.66	23.9	26.8	29.7	34.5	0.15
14*			10.05	—	32.0	32.4	35.2	—	—
15	LC9-CS	1.92	22.24	23.14	27.3	29.0	34.2	36.8	0.095
16			24.13	24.26	23.1	26.1	29.6	33.4	0.065
17*			20.10	—	—	30.4	—	—	—

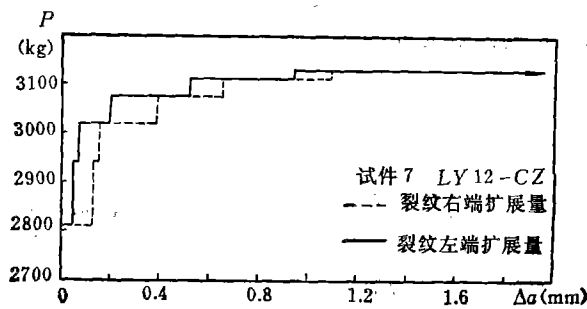


图 2

线。

本实验对每个试件都用云纹法测得了在加载过程中垂直于裂纹方向的全场位移分布和裂纹张开位移, 从而可以得到有关载荷、裂纹张开位移和标称应变等参数之间的各种

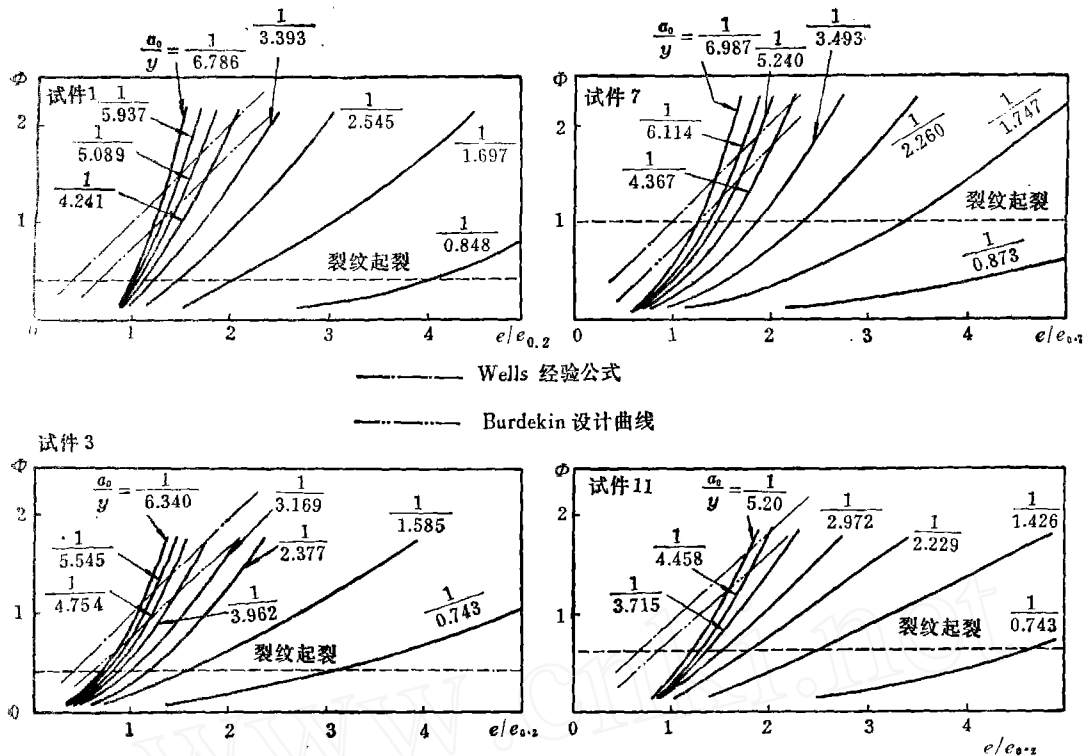


图 3

关系曲线，图 3 给出几个试件的裂纹顶端张开位移  $\delta$  与标称应变  $e$  的无量纲参数关系

( $\Phi = \frac{\delta}{2\pi a_0 e_{0.2}} \sim \frac{e}{e_{0.2}}$ ) 曲线。

这里特别用云纹法测量了在裂纹稳态扩展过程中，裂纹顶端上下相距为试件厚度（即带状颈缩区高度）的两点之间的相对伸长  $\Delta_l$ ， $\Delta_l$  的测量结果列于表 2 中。

#### 四、实验结果的讨论

(1) 从这些试件拉断后的断面来看，厚度为 0.45mm、0.89mm 和 1.50mm 的试件均表现为剪断，断面与试件表面成  $45^\circ$  角，纯属于平面应力状态下的断裂；厚度为 1.92mm 的试件断面中部有很窄的一条平断痕迹，其余大部分与试件表面成  $45^\circ$  角，基本上属于平面应力状态下的断裂。由此表明本实验的含中心裂纹铝合金薄板试件是属于平面应力断裂理论的研究范围。

(2) 从表 2 中  $\sigma_{c(弹)}$  的数值来看，LY12—CZ 和 LY12—CS 这两种铝合金材料的试件在裂纹失稳扩展以前，韧带上的平均应力都已超过了材料的屈服强度，所以它们是在大范围屈服情况下断裂的，必须用弹塑性断裂理论进行分析；而 LC9—CS 铝合金材料的试件在断裂前，韧带上的平均应力远没有达到材料的屈服强度，所以它是在小范围

屈服情况下断裂的。从云纹图也可以看出, 前者在卸载后有较大区域的残余变形; 后者在卸载后除了裂纹顶端附近很小区域外, 看不到残余变形。但是从表2中可以看出, 这三种材料的试件在裂纹起裂后都有稳态扩展的过程, 失稳载荷高于起裂载荷。由此表明, 平面应力状态下的断裂, 不论是否是大范围屈服, 一般都具有裂纹稳态扩展的过程。

(3) 从表2中 $\sigma_{c(净)}$ 的数值可以看到, 这些试件失稳断裂时, 其韧带平均应力明显地低于材料极限强度, 特别是硬化性能差、延伸率较低的LC9—CS试件,  $\sigma_{c(净)}$ 比材料极限强度更低得多, 说明这种材料对裂纹更敏感容易断裂; 然而硬化性能好、延伸率较高的LY12—CZ和LY12—CS材料具有较高的断裂韧性, 这与Varanasi<sup>[8]</sup>的分析结果是一致的。

(4) 从表2中可以看出, 预制疲劳裂纹的试件的失稳载荷明显地高于起裂载荷(除一个短裂纹试件外), 并且有明显的裂纹稳态扩展过程; 而未预制疲劳裂纹的试件的失稳载荷与起裂载荷很接近, 没有明显的裂纹稳态扩展过程。对于初始裂纹长度相近的试件的失稳载荷, 两者差别不大。由此可见, 裂纹尖端是否预制疲劳裂纹对起裂载荷值有明显影响, 但是对失稳载荷关系不大。

(5) 从表2可以看出, 对于初始裂纹长度相近而厚度不同的试件(如试件1、4、7、10、11、14), 它们裂纹失稳扩展时的应力 $\sigma_{c(名)}$ 是相近的, 这表明在平面应力断裂情况下, 厚度对失稳应力值的影响不大。

(6) 从表2可以看出, 对于相同材料相同厚度的有限宽板试件, 短裂纹试件的失稳载荷 $\sigma_{c(名)}$ 比起裂载荷 $\sigma_{i(名)}$ 增加不多, 而较长裂纹的试件则有明显增加; 然而起裂载荷 $\sigma_{i(名)}$ 和失稳载荷 $\sigma_{c(名)}$ 均随初始裂纹长度的增加而降低, 图4给出LY12—CZ( $t=0.89\text{mm}$ )试件的实验数据。

(7) 从图2中 $P\sim\Delta a$ 曲线可见, 随裂纹扩展量增加, 载荷呈阶梯式上升, 裂纹左右两顶端的扩展量并不相等, 但大体上是对称地向两边扩展, 直至失稳断裂。

(8) 从图3的 $\Phi\sim e/e_{0.2}$ 曲线可以看出, 本实验证实了文献[4]分析计算所得到的

结论, 即标称应变随所选择的标称点位置的不同变化很大, 对于 $\frac{a_0}{y} < \frac{1}{4}$  ( $2y$ 为标称点距离)的大标距情形, Burdekin设计曲线是不安全的。必须指出, 这些曲线相当部份已经处于裂纹起裂后的情形, 其裂纹顶端张开位移和标称应变是起裂以后的数值, 所以实际上文献[4]的计算结果和Burdekin设计曲线都已经涉及裂纹起裂以后的情形。

(9) 表2中 $\Delta_f$ 这些数据是裂纹扩展两三步以后稳定下来的测量值, 除LC9—CS材料厚度为1.92mm的试件外,  $\Delta_f$ 均接近材料的延伸率, 由此表明, 以裂纹顶端颈缩区

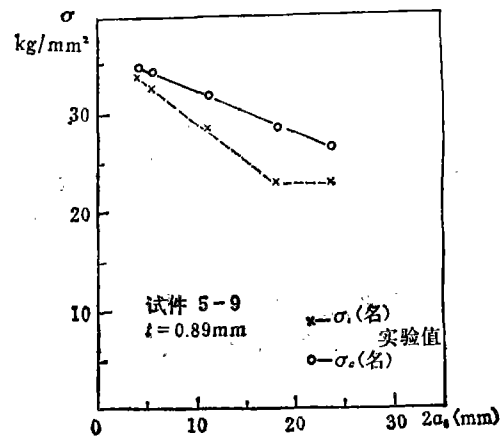


图4

的相对伸长达到材料延伸率作为裂纹扩展的准则<sup>[6]</sup>,在一定程度上得到了实验的验证. 对于 LC9—CS 材料厚度为 1.92mm 的试件, 如前面所述, 其断面中部有一些平断的痕迹, 致使此相对伸长的测量值低于材料的延伸率. 此外, 当裂纹刚起裂不久, 此相对伸长较小( $\Delta_l$  的  $\frac{2}{3}$  左右), 裂纹扩展两三步便逐渐稳定下来达到  $\Delta_l$ . 从试件断裂后的断面可以看到, 初始裂纹顶端附近有一小三角形平断痕迹, 所以起裂时此相对伸长达不到剪断的延伸率; 随着裂纹扩展, 断口逐渐变为剪断, 这时此相对伸长便符合材料的延伸率.

上述裂纹扩展准则不但得到实验验证, 而且物理意义也很清楚. 至于裂纹顶端的张开角准则<sup>[2]</sup>, 其临界值是需要实验测定的, 不像这里用材料的延伸率显得直接方便; 又如同用最大主应力达到材料拉伸极限强度作为裂纹扩展准则<sup>[8]</sup>, 实际上这时材料没有达到延伸率, 所以并不一定就破断.

(10) 在含裂纹薄板试件实验的过程中, 通过读数显微镜还观察到, 在裂纹即将起裂和每步扩展之前, 裂纹前方 0.2mm~0.3mm 处先出现长约 0.2mm 左右的新裂缝, 然后裂纹才向前扩展并与前方新裂缝合并. 我们认为这可能是由于裂纹顶端附近处于平面应变和平面应力的混合状态, 因而有比较大的三轴张力, 所以裂纹顶端附近的应力强度反而会比裂纹前方低而发生上述现象.

## 五、结 论

综上所述, 对于本实验的试件材料、几何尺寸和加载情况, 可以有如下结论:

(1) 平面应力状态下的断裂, 不论是否是大范围屈服, 一般都具有裂纹稳态扩展过程, 失稳载荷高于起裂载荷; 硬化性能好、延伸率较高的材料具有较好的断裂韧性.

(2) 裂纹尖端是否予制疲劳裂纹对起裂载荷值有明显影响, 但是对失稳载荷关系不大.

(3) 在平面应力断裂情况下, 厚度对失稳应力值的影响不大.

(4) 短裂纹试件的失稳载荷比起裂载荷增加不多, 较长裂纹则有明显增加; 起裂载荷和失稳载荷均随初始裂纹长度增加而降低.

(5) 在载荷控制的加载情况下, 载荷是随裂纹扩展量呈阶梯式上升的.

(6) 从本实验得到的  $\Phi \sim e/e_{0.2}$  曲线证实了文献[4]分析计算所得到的结论; 同时指出, 这些曲线的相当部分已经处于裂纹起裂以后的情形, 所以实际上文献[4]的计算结果和 Burdekin 设计曲线都已经涉及裂纹起裂以后的情形.

(7) 文献[5]采用的以裂纹顶端颈缩区的相对伸长达到材料延伸率作为裂纹扩展的准则在一定程度上得到了本实验的验证.

## 参 考 文 献

- (1) Feddersen C. E., Simonen F. A., Hulbert L. E. and Hyler W. S., An Experimental and Theoretical Investigation of Plane-Stress Fracture of 2024-T351 Aluminum Alloy,

- NASA CR-1678, (1970).
- (2) Anderson H., A Finite-Element Representation of Stable Crack-Growth, *J. Mech. Phys. Solids*, 21(1973), 337-356.
- (3) Varanasi S. R., Analysis of Stable and Catastrophic Crack Growth under Rising Load, *Flaw Growth and Fracture*, ASTM STP 631, (1977), 507-519.
- (4) 徐纪林, 王自强, 平面应力的弹塑性断裂模型及其有限元分析, *固体力学学报*, 第2期, 1980年, 183-193.
- (5) 徐纪林, 平面应力裂纹稳态扩展的弹塑性大变形有限元分析, *力学学报*, 第3期, 1982年, 272-279.
- (6) 薛以年, 韩金虎, 用激光散斑法和云纹法测量含裂纹薄板的裂纹张开位移, *力学学报*, 第五期, 1981年, 501-506.

## EXPERIMENTAL STUDY ON CRACK STABLE GROWTH IN CENTER-CRACKED ALUMINUM-ALLOY SHEETS

Xue Yi-nian, Han Jin-hu and Xu Ji-lin

*(Institute of Mechanics, Academia Sinica)*